

N° D'ORDRE
8

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

EMILE BLANCHARD

INGÉNIEUR AGRONOME

DIRECTEUR DES SERVICES AGRICOLES DE SEINE-ET-OISE

1^{re} THESE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES ÉQUILIBRES PHYSICO-CHIMIQUES CHEZ QUELQUES PLANTES AGRICOLES.

2^e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le *16 Juin* 1932, devant la Commission d'examen.

Président : MM. LAPICQUE

Examineurs } LUTAUD
COMBES

ARPAJON

IMPRIMERIE DE la Gazette de Seine-et-Oise

1932

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

EMILE BLANCHARD

INGÉNIEUR AGRONOME

DIRECTEUR DES SERVICES AGRICOLES DE SEINE-ET-OISE

1^{re} THESE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES ÉQUILIBRES PHYSICO-CHIMIQUES CHEZ QUELQUES PLANTES AGRICOLES.

2^e THESE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 1932, devant la Commission d'examen.

Président : MM. LAPICQUE

Examineurs { *LUTAUD*
COMBES

ARPAJON

—
IMPRIMERIE DE la Gazette de Seine-et-Oise
—

1932

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen
Doyen honoraire

Professeurs honoraires

G. MAURAIN, *Professeur*, Physique du globe.
M. MOLLIARD.
H. LE CHATELIER.
H. LEBESGUE.
A. FERNBACH.
A. LEDUC.
Emile PICARD.
Rémy FERRIER.

E. GOURSAT Analyse supérieure et algèbre supérieure.
P. JANET Electrotechnique générale.
F. WALLERANT .. Minéralogie.
P. PAINLEVÉ Mécanique analytique et mécanique céleste.
M. CAULLERY ... Zoologie (Evolution des êtres organisés).
Emile Borel Calcul des probabilités et Physique mathém.
H. ABRAHAM Physique.
M. MOLLIARD Physiologie végétale.
E. CARTAN Géométrie supérieure.
Gabriel BERTRAND. Chimie biologique.
Jean PERRIN Chimie physique.
L. LAPICQUE Physiologie générale.
M^{me} P. CURIE Physique générale et radioactivité.
G. URBAIN Chimie générale.
L. MARCHIS Aviation.
E. VESSIOT Théorie des fonctions et théorie des transfor-
mations.

Professeurs

A. COTTON Physique générale.
J. DRACH Application de l'analyse à la géométrie.
Charles FABRY ... Physique.
R. LESPIEAU Théories chimiques.
P. PORTIER Physiologie comparée.
Charles PÉREZ ... Zoologie.
E. BLAISE Chimie organique.
P.-A. DANGEARD .. Botanique.
Léon BERTRAND .. Géologie structurale et géologie appliquée.
E. RABAUD Biologie expérimentale.
G. JULIA Calcul différentiel et calcul intégral.
Paul MONTEL Mécanique rationnelle.
V. AUGER Chimie appliquée.
P. WINTREBERT .. Anatomie et histologie comparées.
O. DUBOSCQ Biologie maritime.
Eugène BLOCH ... Physique théorique et physique céleste.
N. Etude des combustibles.
L. LUTAUD Géographie physique et géologie dynamique.
Henri VILLAT ... Mécanique des fluides et applications.
Ch. JACOB Géologie.
P. PASCAL Chimie minérale.
Léon BRILLOUIN .. Théories physiques.
E. ESCLANGON ... Astronomie.
H. BÉNARD Mécanique expérimentale des fluides.
C. MAUGUIN Minéralogie.
L. BLARINGHEM .. Botanique.
A. GUILLIERMOND. Botanique (P. C. N.).
A. DENJOY Mathématiques générales.
A. DUFOUR Physique (P. C. N.).
H. BÉGHIN Mécanique physique et expérimentale.



E. PÉCHARD Chimie (Enseig. P. C. N.).
A. GUILLET Physique.
M. GUICHARD Chimie minérale.
A. MICHEL-LÉVY .. Pétrographie.
A. DEREIMS Géologie.
H. MOUTON Chimie physique.
L. DUNOYER Optique appliquée.
M. JAVILLIER Chimie biologique.
ROBERT-LÉVY Zoologie.
A. DEBIERNE Radioactivité.
E. DARMOIS Physique.
G. BRUHAT Physique.
F. PICARD Zoologie (Evolution des
êtres organisés).
L. JOLEAUD Paléontologie.
M. FRÉCHET Calcul des Probabilités et
Physiques mathématiques

M^{me} RAMART-LUCAS Chimie organique.
FOCH Mécanique expérimentale
des fluides.
PAUTHENIER Physique (P. C. N.).
VILLEY ... Mécanique physique et ex-
périmentale.
DE BROGLIE Théories physiques.
LABROUSTE Physique du Globe.
FREUNDLER Chimie (P. C. N.).
PRENANT .. Zoologie.
P. JOB Chimie générale.
CHRÉTIEN... Optique appliquée.
BOHN Zoologie (P. C. N.).
BOURGUÉL.. Chimie (P. C. N.).
COMBES .. Sciences naturelles (P.C.N.)
GARNIER .. Mécanique rationnelle.

Secrétaire
Secrétaire honoraire

A. PACAUD.
D. TOMBECK.

PREMIÈRE THÈSE

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES EQUILIBRES PHYSICO-CHIMIQUES CHEZ QUELQUES PLANTES AGRICOLES COMPENSATIONS MINÉRALES

INTRODUCTION

L'emploi des engrais chimiques joue, dans l'agriculture contemporaine, un rôle de toute première importance. La consommation de ces substances s'accroît sans cesse car de grands efforts ont été réalisés pour en diffuser la connaissance dans tous les milieux agricoles.

Les champs d'expériences et de démonstrations créés, chaque année, sont très nombreux. Mais ils ont, surtout, pour objet de contrôler l'action des engrais sur la morphologie des divers organes de la plante et l'importance quantitative et qualitative des résultats obtenus.

Par l'analyse des récoltes, on détermine ce qu'une culture exporte du sol en certains éléments et comme on établit, approximativement, d'autre part, la teneur du sol en ces mêmes éléments, on en déduit les quantités des divers principes fertilisants qu'il faut ajouter au sol pour faire face aux besoins des plantes ce que Georges VILLE avait résumé dans cette formule : « L'engrais est constitué par les matières nécessaires à la plante et qui manquent au sol ».

Il nous a toujours semblé que la notion d'engrais qui découle de cette conception avait besoin d'être précisée et élargie. Il nous apparaissait qu'en outre des principes fertilisants considérés, à juste titre, comme indispensables à la plante au point de vue plastique, les engrais chimiques devaient apporter certains éléments susceptibles de jouer, au point de vue physico-chimique, un rôle important.

C'est pour nous permettre d'examiner ce qu'il y a de fondé dans cette opinion que nous avons sollicité de M. le professeur LAPICQUE l'autorisation de venir travailler à son laboratoire afin de pouvoir entreprendre le contrôle analytique des essais culturaux.

M. LAPICQUE a bien voulu réserver un accueil des plus aimables à notre demande et depuis plus de sept ans sous sa direction et avec la très aimable collaboration de M. CHAUSSIN des essais culturaux de tous ordres sont poursuivis dans divers champs d'expérience et à la Station de biologie agricole créée par M. L. LAPICQUE au Parc Saint-Maur.

Nous tenons à le remercier ici de la bienveillance qu'il nous a témoignée et de la sollicitude avec laquelle il a guidé nos travaux. Nous remercions aussi M. CHAUSSIN, chef du laboratoire agricole, dont la direction technique tout à fait cordiale nous a permis aussi de les mener à bonne fin.

Dans notre travail, nous avons eu en vue l'étude minérale du milieu intérieur * (partie soluble) de la plante, en nous adressant surtout à la feuille qui en est le laboratoire principal.

L. LAPICQUE, à la suite de ses études sur les algues, ne perdait aucune occasion d'insister sur la grossière approximation que constitue l'analyse de la plante envisagée globalement, sucs et structures, au point de vue physiologique. Dans ses directives, il nous a fait comprendre tout l'intérêt qui s'attachait à l'étude de la partie soluble, et particulièrement de sa composition minérale, nous fournissant en même temps sa méthode des bouillons pour cette investigation.

Comme point de départ, notre courant d'idées, nous amenait à l'étude comparative des deux principales formes sous lesquelles les engrais potassiques, chlorurés et sulfate étaient offertes par le commerce, rapprochant les résultats des expériences culturales au point de vue des rendements, des modifications apportées dans le milieu intérieur par chacun de ces engrais employés isolément.

Nous avons ainsi déterminé dans quelques plantes agricoles les équivalents électrolytiques de l'anion Cl monovalent et de l'anion SO_4 divalent qui entrent dans la composition du milieu intérieur de ces plantes .

Puis élargissant notre champ d'investigation, nous avons étendu notre étude à toutes les substances minérales principales de la plante.

A l'heure et à l'époque de nos prélèvements, les nitrates n'existaient qu'à l'état de traces dans la

* Nous donnons dans l'historique la définition suivante du milieu intérieur : « Il existe dans les cellules un liquide vacuolaire et des liquides adsorbés par le protoplaste et la paroi cellulaire. C'est le mélange de ces liquides extraits par la méthode des bouillons de L. Lapique que nous appelons milieu intérieur »,

plante; alors en dosant, dans le bouillon, les chlorures, les sulfates, les silicates, les phosphates et, globalement, les sels à acides organiques, nous avons à peu près toute la matière minérale.

Dans un certain nombre de parcelles contiguës, nous avons fait des additions d'engrais, variables pour chacune d'elles, de façon à obtenir dans la plante de fortes variations d'un anion particulier et à suivre la répercussion sur les autres anions de l'ensemble.

Dans chaque parcelle, nous avons intercalé différentes espèces de plantes, ce qui nous permettait de constater, pour les différentes plantes d'une même parcelle, l'électivité, plus ou moins grande, pour les anions expérimentés dans chacune d'elles; et, en comparant les résultats obtenus, pour une même plante, dans les parcelles différentes, nous avons obtenu les modalités suivant lesquelles les différents anions se substituaient les uns aux autres.

Ayant, dans quelques cas, mesuré en même temps le Δ cryoscopique, nous avons essayé d'établir un rapport entre l'addition de tel engrais et la pression osmotique facteur de croissance dans la plante.

En évaluant les anions en équivalents électrolytiques qu'il était naturel de rapporter au litre d'eau de la plante, puisqu'il s'agit du milieu intérieur, cette unité nous permettait la comparaison, entre eux, de ces anions.

En en faisant la somme, dans le cas d'une même plante cultivée dans différentes parcelles, nous avons obtenu des valeurs si voisines, que les substitutions d'anions, les uns aux autres nous ont apparu, comme concourant à une régulation physico-chimique.

Cette constance pour une espèce déterminée, se retrouvait pour une autre espèce, mais la somme

étant différente, nous avons de la sorte, fait ressortir, en même temps, qu'il existe une véritable spécificité.

Notre travail met, en outre, en lumière un mécanisme de régulation osmotique dans la plante tout à fait comparable avec ce qui se passe dans les organismes animaux.

Dans cette régulation, certains anions des engrais, en entrant dans la composition du milieu intérieur de la feuille, provoquent la diminution des anions des acides organiques que la plante fabrique à partir de ses réserves hydrocarbonées constituant ainsi une modification physiologique et économique importante. De cette façon, des anions que l'on considérerait comme sans intérêt autre celui qui pouvait résulter de leur répercussion osmotique, arrivent ainsi à jouer un véritable rôle d'engrais par action indirecte.

Nous avons fait suivre l'exposé des essais contrôlés poursuivis au laboratoire de physiologie générale de comptes rendus d'expériences faites sur diverses cultures avec les sels de potasse.

Elles ont donné des résultats d'un très grand intérêt technique que permettent de mieux comprendre les conclusions des travaux effectués au laboratoire.



HISTORIQUE

EXPOSÉ SOMMAIRE DES THÉORIES RELATIVES A LA NUTRITION DES VÉGÉTAUX CULTIVÉS

a) Les tables de Wolff.

Depuis longtemps les chimistes se sont préoccupés de déterminer la composition minérale des diverses espèces végétales. Le nombre des travaux effectués à ce sujet est considérable; ils avaient pour objet d'établir la base scientifique sur laquelle doit reposer le principe de la restitution au sol des substances minérales exportées par les récoltes.

Les tables de Wolff publiées en 1869 et établies en déterminant des moyennes entre les résultats obtenus par un certain nombre d'auteurs procédaient de cet état d'esprit. Mais les chiffres donnés n'avaient que des valeurs discutables car les méthodes d'analyses employées variaient avec les auteurs.

JOULIE avait d'ailleurs fait remarquer que la valeur scientifique de ces tables pouvait être mise en doute : elles étaient entachées d'un vice initial car elles admettaient, en effet, qu'une espèce végétale a une composition fixe alors qu'il n'en est rien, (³⁴)

Une même espèce végétale, une même variété peut, en effet, suivant le milieu dans lequel elle pousse, selon aussi, les circonstances atmosphériques, avoir des compositions différentes. Deux échantillons d'une même variété de blé peuvent avoir, entre eux, plus de différence qu'un échantillon de blé et un échantillon de sarrazin par exemple.

Il n'existe par conséquent pas de composition minérale type pour une espèce végétale. S'il est des substances absolument indispensables qu'on ne peut remplacer comme le phosphore, il en est qui peuvent se substituer les unes aux autres dans une certaine limite.

C'est le cas du potassium et du calcium par exemple. D'autres corps comme le silicium, peuvent ne pas se trouver dans le milieu où se développe le végétal sans nuire à son complet développement.

MALAGUTI et DUROCHER, en 1858, disaient, à ce sujet, dans leur mémoire : « Quelle que soit la faculté d'élection d'un végétal, les éléments inorganiques les plus abondants tendront à remplacer ceux qui se trouvent en faible quantité. En outre, *les éléments faisant partie de la sève et ainsi interposés à l'état liquide dans les cavités du végétal, mais n'entrant point encore dans la composition de son tissu, viennent s'ajouter à ceux qui en font partie essentielle et de là résulte une cause particulière de complication.* » ⁽⁴⁶⁾

Ces auteurs semblent avoir pressenti l'intérêt de l'étude de la partie soluble. S'ils ne l'ont pas poursuivie, c'est que probablement l'absence de méthode les en a empêchés et aussi, peut-être l'importance considérable des travaux qu'ils avaient entrepris et qu'ils ne tenaient pas à compliquer par des études nouvelles d'ailleurs longues et délicates,

b) Points de vue sous lesquels nous envisagerons la minéralisation du milieu intérieur.

Le but de cette étude fut, tout d'abord, d'étudier l'action des sels de potasse sur la minéralisation du milieu intérieur des plantes dont nous préciserons le sens plus loin.

Au lendemain de la guerre, les Mines de Potasse d'Alsace mirent sur le marché des quantités de plus en plus considérables de sels chlorurés de potasse sous le nom de sylvinites pauvres ou riches et de chlorures. Elles avaient intérêt à éviter la transformation de ces sels en sulfates car l'opération élève très sensiblement le prix de l'engrais. Il était dès lors intéressant d'étudier comparativement à doses égales de cathion K, l'influence des anions Cl et SO⁴ sur le milieu intérieur et sur les rendements de diverses plantes cultivées.

Puis, étendant le problème, nous avons été conduits à étudier les variations survenues dans la composition des sucs en examinant le rôle des principaux anions Cl, SO⁴, SiO³, PO⁴ et globalement celui des anions des divers sels à acides organiques qui existent dans les plantes et cela sous l'influence des divers engrais. Nous avons déterminé en même temps le Δ cryoscopique comme repère de la pression osmotique.

C'est donc en nous plaçant au point de vue des anions que nous avons étudié les variations du milieu intérieur.

c) Matières minérales plastiques et osmotiques.

Examinées au point de vue du rôle qu'elles jouent, les substances minérales qui entrent dans la composition du milieu intérieur des plantes, sont divisées en substances plastiques et substances osmotiques.

Mais par le fait même qu'elles sont absorbables, toutes ces substances sont d'abord osmotiques. Certaines d'entre elles jouent ensuite un rôle plastique tandis que les autres continuent de jouer un rôle exclusivement osmotique.

1° *Substances minérales plastiques.* — Les substances minérales plastiques sont celles qui entrent dans la composition des tissus et des plasmas.

C'est le cas, par exemple, des *nitrates*, dont l'azote entre dans la formation des matières albuminoïdes, des *sulfates* dont le soufre entre dans la proportion de 2 % dans la composition de ces mêmes albuminoïdes, des *phosphates* qui fournissent le phosphore nécessaire à la formation des éléments fondamentaux de la cellule : lécithine végétale, phytine et autres phospho-lipides.

Parmi les *cations*, nous citerons la *potasse* qui entre dans la constitution d'un certain nombre de composés solubles, la *chaux* qui entre aussi dans la composition des cellules avec la possibilité de remplacer dans une certaine limite de potasse. Nous citerons enfin la *magnésie* dont le magnésium fait partie du noyau chlorophyllien.

Cette énumération n'est évidemment pas limitative car d'autres anions et d'autres cations entrent aussi dans la composition des végétaux.

2° *Substances minérales osmotiques.* — La plante contient environ 30 à 35 % de son poids sec total de matières solubles.

Dans les feuilles, notamment, cette partie soluble renferme 25 % de matières minérales tandis que la partie insoluble n'en renferme que 5 % soit cinq fois moins.

Cette proportion de matières minérales existant dans la partie soluble est très élevée car elle est de beaucoup supérieure aux besoins plastiques de la

plante. Elle joue incontestablement un rôle dans les échanges et les migrations et encore dans les mouvements de l'eau notamment dans l'absorption de l'eau des solutions du sol en général très diluées.

Il est certain que la plus ou moins grande quantité de matières minérales dans le végétal exerce une action physico-chimique dans l'absorption de l'eau du sol, dans les échanges et migrations entre les organes de la plante au cours de son développement (L. LAPICQUE variations saisonnières dans la composition chimique des algues marines) ⁽³⁶⁾.

Aux substances minérales plastiques il y a lieu d'ajouter les *matières minérales catalytiques* qui sont des substances que M. Gabriel BERTRAND a appelées « *les infiniment petits chimiques* ». Elles comprennent un nombre de corps qui semblent jouer un rôle analogue à celui des diastases et probablement en conjugaison avec elles.

En ce qui concerne la composition minérale, optimale du milieu intérieur de la plante la première idée qui se présente à l'esprit est que ce milieu devrait être uniquement composé de matières minérales plastiques dans des proportions nécessaires à la formation des tissus. Mais si l'on envisage les échanges et migrations des molécules et des ions qui s'effectuent dans le corps du végétal et la mobilité de ces molécules et ions on ne peut manquer de faire intervenir la valence des ions dans l'interprétation des résultats obtenus.

On peut se demander s'il ne serait pas économique de remplacer dans la part de tonicité due aux éléments minéraux, des éléments plastiques par d'autres éléments non plastiques moins onéreux dans la seule mesure où leur proportion ne diminuera pas la quantité de matériaux plastiques nécessaires pour un développement ultérieur.

Dans le cas particulier qui nous intéresse, celui des engrais potassiques par exemple, si l'on compare l'action du sulfate de potasse et celle du chlorure de potassium on est amené à constater la substitution dans le milieu intérieur de la plante de l'ion Cl *monovalent* et *osmotique* à l'ion SO⁴ *divalent* et *plastique*. Nous ferons à ce sujet une mise au point d'une grande importance qui montrera la complexité des questions dont nous avons entrepris l'étude.

d) Les lois du minimum et des rapports physiologiques.

C'est à LIEBIG que l'on doit la loi du minimum qui malgré toutes les discussions auxquelles elle a donné lieu reste une loi fondamentale de la nutrition des végétaux.

D'après cette loi la production d'une plante dans un milieu déterminé dépend de la quantité du principe nutritif qui s'y trouve en plus faible quantité.

Si l'un des éléments nécessaires à l'évolution des plantes se trouve en quantité insignifiante alors que les autres éléments s'y trouvent en quantités surabondantes, le développement des plantes restera faible et sera seulement en rapport avec quantité de l'élément qui n'est presque pas représenté dans le milieu nutritif.

HELLRIEGEL et WILFARTH faisant des expériences sur la nutrition azotée de l'orge ont montré que dans un milieu renfermant les autres éléments en quantités suffisantes, le poids de la récolte était proportionnel au poids d'azote nitrique mis à la disposition de l'orge (*).

MAZE a énoncé la *loi des rapports physiologiques*,

D'après cette loi, le poids d'une récolte déterminée ne serait plus fonction de la *quantité absolue* des principes nutritifs mis à la disposition des plantes mais

des rapports dans lesquels ces principes nutritifs se trouvent dans le milieu nutritif.

« Dans un milieu liquide spécialement étudié, le maïs achève son cycle végétatif, de la germination à la maturation des graines, si la solution demeure aseptique.

« On fait pousser des plants de maïs jusqu'à ce qu'ils aient atteints un poids moyen de 10 gr. A partir de ce moment on leur offre une solution incomplète comprenant un seul élément nutritif de ceux qui composent la solution mère.

« Dans la solution incomplète la plante vit sur la réserve de matières minérales qu'elle a empruntées à la solution mère ; les éléments qui constituent cette réserve présentent entre eux des rapports quantitatifs qui répondent aux conditions les plus favorables à la plante *puisque c'est elle qui les a réglés*.

« L'élément en solution se présente en très grand excès par rapport aux autres et doit vraisemblablement troubler l'évolution de la plante.

« Bien que les éléments en solution soient offerts à une concentration très favorable à la végétation, c'est l'eau distillée qui donne le meilleur résultat et de beaucoup....

« D'après la loi du minimum on aurait dû obtenir des résultats tout différents ; c'est *la loi des rapports physiologiques* qui règle le rendement des récoltes » ⁽⁵⁰⁾.

La conclusion de MAZE serait acceptable sans réserve s'il avait montré qu'il n'y avait eu aucune exosmose dans le milieu de culture. Or, tandis que dans d'autres travaux ⁽⁵¹⁾ il a nettement pressenti cette exosmose il ne la mentionne ni dans sa note ni dans son mémoire.

La loi du minimum que l'on peut considérer comme évidente ainsi que le dit ANDRÉ ⁽⁵²⁾ est basée sur l'idée de la constitution fixe des tissus. Elle ne

découle pas de l'expérience et ce qui explique la confusion qui existe à son sujet dans les esprits c'est qu'on ne l'a jamais nettement développée.

Nous avons déjà dit, d'après JOULIE, que les tables de WOLFF attribuaient aux diverses espèces végétales une fixité de composition qui n'existe pas en réalité. Cette observation est fondée sur les résultats obtenus dans l'analyse globale de la plante, mais il en est autrement si, en employant la méthode des bouillons de L. LAPICQUE, on sépare la partie soluble de la partie insoluble. On constate alors que les tissus, lorsqu'on prend des organes semblables, présentent, pour une espèce déterminée, une composition constante à une époque déterminée, tandis que la partie soluble présente, au contraire, des différences de compositions considérables. La loi du minimum doit être considérée comme évidente en ce qui concerne la partie plastique insoluble et les réserves.

e) **Équilibres physiologiques.**

La question des *équilibres physiologiques* est incontestablement parmi les plus intéressantes de la physiologie végétale et par voie de conséquence de l'agriculture. Mais il est absolument indispensable de bien préciser ce qu'on entend par cette expression.

LOEB divise les substances qui entrent dans les solutions absorbées par les végétaux en deux groupes : les *substances nutritives* proprement dites comme CO_2 , NH_4 , PO_4 , SO_4 , K, Mg et les *substances protectrices* comme Ca et Na. ⁽⁴⁵⁾.

OSTERHOUT a composé empiriquement, en tâtonnant, des solutions dans lesquelles les divers éléments qui les constituent neutralisent naturellement leur toxicité. Il a donné à ces solutions le nom de *solution physiologiquement équilibrées* et il admet

que certaines solutions sont suffisamment diluées pour qu la présence des substances antitoxiques ne soit pas nécessaire. Dans ce cas, il ne s'agit plus de solutions physiologiquement équilibrées mais seulement de *solutions nutritives*. ⁽⁶⁰⁾.

L'étude du sol considéré comme milieu nutritif présente de si grandes difficultés qu'il devient presque impossible d'y chercher des formules susceptibles de donner un développement optimum aux végétaux cultivés. D'ailleurs même dans le cas d'application d'engrais chimiques, les quantités de principes fertilisants ajoutées sont telles, dans la pratique agricole ordinaire, qu'elles n'atteignent pas les doses toxiques.

En réalité les équilibres physiologiques ne peuvent être envisagés que dans les cultures faites dans des milieux synthétiques, c'est-à-dire en dehors de la pratique agricole.

D'autre part les engrais chimiques solubles ou solubilisés régulièrement distribués dans le sol sont adsorbés en partie dans les colloïdes (humus et argile) de la terre arable, ce qui diminue encore les risques de toxicité. Les colloïdes des racines auront à disputer aux colloïdes du sol les substances nutritives adsorbées.

Il existe cependant des sols dont la richesse en calcaire est telle que le calcium peut être toxique pour certains végétaux.

C'est la raison pour laquelle l'étude de certains organes, de la feuille notamment, peut guider dans la recherche des conditions à réaliser pour permettre à la plante de s'accroître dans les meilleures conditions en cherchant à déterminer ce qui manque au sol et dans ce cas alors, c'est bien la loi du minimum qui est en jeu.

LAGATU et MAUME, dans leurs travaux, se sont inspirés de cette idée mais ils considèrent le tissu

global comprenant à la fois la partie insoluble et le liquide intérieur. ⁽³⁶⁾

Quand on cherche à déterminer les raisons d'un développement déficient de la plante, ce n'est pas aux parties plastiques insolubles qu'il faut s'adresser mais aux parties solubles du milieu intérieur, c'est-à-dire à celles aux dépens desquelles vont se constituer les nouveaux tissus car c'est dans ce milieu intérieur que quelque chose peut manquer mais non dans les parties plastiques déjà élaborées parmi lesquelles il peut d'ailleurs y avoir aussi des matières minérales insolubilisées sans rôle physiologique.

Il est donc important de ne pas étudier ensemble les sucs et la structure comme MALAGUTI et DUROCHER le faisaient en 1858 malgré leur désir évident de faire mieux ainsi que nous l'avons déjà montré.

On comprend maintenant pourquoi il nous semble indispensable d'utiliser la méthode de L. LAPICQUE pour étudier la question *des équilibres intérieurs* sur le suc des feuilles qui doivent être considérées comme le laboratoire essentiel de la plante. Ces sucs sont de compositions très variables comme nous l'avons dit déjà et les substitutions les plus larges peuvent s'y produire selon les sols et la nature des engrais employés.

Cette étude pourra nous conduire à des conclusions intéressantes en comparant la composition du milieu intérieur au développement de la plante à diverses périodes de son développement.

Cette méthode, nous ne l'ignorons pas, peut faire l'objet de certaines critiques. On peut lui reprocher notamment de donner un milieu intérieur des plantes auquel peuvent s'ajouter des réserves minérales et certains principes immédiats élaborés ou en voie d'élaboration. Mais il y a lieu d'observer que cette

erreur est de faible importance et qu'elle est incontestablement moins grande que celle que l'on commet quand on étudie le global de la feuille, sucs et tissus réunis, ainsi que le montrent l'étude critique de L. LAPICQUE et J. CHAUSSIN ⁽³⁹⁾ et celle d'Andrée DUMONT. ⁽³²⁾

f) Le milieu intérieur.

Nous avons déjà, à diverses reprises, employé l'expression de *milieu intérieur*. Il nous faut en préciser le sens.

Claude BERNARD a défini le milieu intérieur chez les animaux : « Partie qui pénètre tous les tissus et constitue l'ensemble de tous les liquides interticiels expression de toutes les nutriments locales, sources et confluent de tous les déchets alimentaires. »

Le milieu intérieur chez les animaux est extérieur aux cellules mais il les baigne toutes. Elles y puisent leurs aliments et elles y déversent leurs déchets.

Chez les végétaux, il n'y a rien de semblable. Les méats intercellulaires sont vides mais il existe dans les cellules un liquide vacuolaire et des liquides adsorbés par le protoplaste et la paroi cellulaire. C'est le mélange de ces liquides extraits par la méthode des bouillons de L. LAPICQUE que nous appelons milieu intérieur. A ces liquides peuvent s'ajouter non seulement de petites quantités de matières de réserves et de principes élaborés ainsi que nous l'avons dit mais encore les sèves brute et élaborée qui se trouvent dans les faisceaux libéro-ligneux. Cependant ces produits étrangers étant en faible quantité, l'erreur commise peut être considérée comme négligeable. Nous conservons donc cette expression qui a l'avantage d'être simple et claire

en mêm temps. C'est en somme la partie soluble dans l'eau bouillante de la plante ou des organes de la plante que nous allons étudier.

Cette étude porte exclusivement sur le milieu intérieur ainsi défini. Le premier objectif que nous nous sommes donné a été d'ordre physico-chimique. Nous avons, en effet, déterminé le Δ cryoscopique des tissus végétaux en le considérant comme mesure de la concentration moléculaire globale et de la pression osmotique.

Le poids de l'extrait de la partie soluble rapporté à 100 d'eau de la plante permet de déterminer le poids moléculaire moyen des substances en dissolution dans le bouillon en utilisant la formule de RAOULT.

La notion de poids moléculaire moyen a été introduite en physiologie végétale par MAQUENNE. Elle fait comprendre les mécanismes de condensation des substances à l'intérieur des végétaux comme ceux, par exemple, qui ont été mis en lumière pour les hydrates de carbone au cours de leurs migrations dans la plante. ⁽⁵⁰⁾

Grâce à la séparation du milieu intérieur formant la partie soluble de la plante, on a pu comparer la minéralisation du bouillon à celle de la partie insoluble.

Les discussions dont a été l'objet la *loi du minimum* proviennent de ce que cette dernière n'avait pour ainsi dire jamais été précisée ni bien démontrée. C'était plus une vue de l'esprit qu'une loi expérimentale car elle envisageait ainsi que nous l'avons vu surtout la *partie plastique* des végétaux qui conserve dans une même variété une composition à peu près fixe.

Mais la *partie osmotique*, dans laquelle peuvent s'effectuer les substitutions les plus larges, a une composition variable de sorte que le mélange de la

partie plastique et de la *partie osmotique* ne peut pas avoir, par conséquent, de composition fixe.

Il résulte des travaux effectués sur ces questions que si l'on étudie la *pression osmotique* d'un organe déterminé comme la feuille, par exemple, à un *stade déterminé de son développement* et si on la soumet aux diverses actions extérieures, on est amené à conclure que la pression osmotique traduite par le Δ cryoscopique du milieu intérieur peut être considérée comme ayant une valeur spécifique à peu près fixe, peu variable, caractéristique de la plante.

Mais ce Δ cryoscopique évolue avec la plante elle-même, varie avec les organes étudiés et est soumis aux influences de la température et de l'état hygrométrique.

Il est donc essentiel, dans les études qui comportent des comparaisons, de bien étudier des organes aussi semblables que possible et prélevés au même moment, c'est-à-dire dans des conditions aussi identiques que possible.

Si, dans le milieu intérieur de la plante, on étudie la partie minérale et la partie organique, on constate qu'il existe un autre élément de fixité dans la composition du végétal.

Les tables de WOLFF, destinées à permettre de déterminer les quantités de matières minérales enlevées au sol, portaient, en quelque sorte, de l'idée de proportionnalité existant entre la matière minérale et la matière organique.

PELLET, en 1879, dit : « La somme des capacités de saturation des bases minérales contenues dans une même espèce végétale est sensiblement constante quelles que soient leurs proportions relatives » ⁽⁵²⁾

MAZE conclut, à la suite d'une étude sur le maïs : « Il est donc légitime de déduire de l'ensemble des observations concernant la richesse minérale des feuilles que la *constance relative du taux des cendres*

est liée aux fonctions de création et d'élaboration des matières organiques qui ont leur siège dans ces organes ». ⁽⁵⁶⁾.

COLIN et A. GRANDSIRE disent : « Si l'on examine comparativement dans les deux espèces de feuilles les sels minéraux et les matières organiques au cours du développement en établissant le rapport pondéral des cendres à la matière organique, on constate qu'il augmente sans désemparer dans les feuilles blanches et varie à peine dans les feuilles vertes ». ⁽⁵⁶⁾.

Toutes ces conclusions se rapportent à une plante ou à un organe de plante la partie soluble et la partie insoluble étant globalement réunies.

J. CHAUSSIN en étudiant le milieu intérieur arrive aux conclusions suivantes : « La constance approximative au cours du développement dans le rapport de la matière minérale à la matière organique dans le milieu intérieur de la feuille, laboratoire principal de la plante, nous paraît être un caractère fondamental ». ⁽⁵⁷⁾.

Il arrive aux mêmes conclusions pour la pomme de terre et d'autres plantes cultivées mais naturellement avec des variations qui dépendent des espèces, de sorte que l'on peut reconnaître, à cette constatation, le caractère général d'une loi physiologique. ⁽⁵⁸⁾

Cet auteur, au cours de recherches sur l'influence de la fumure sur la pression osmotique, a montré que l'engrais complet avait sur cette dernière une influence certaine.

Dans le cas du blé, la pression osmotique permet de vérifier la loi de MAQUENNE relative à la migration vers les points de moindre concentration par condensation dans les mouvements des réserves d'abord vers la tige, organe transitoire de réserve, puis ensuite vers l'épi. ⁽⁵⁹⁾

Mais en réalité dans les phénomènes biologiques, il n'y a pas que les forces osmotiques qui entrent en jeu. Certains phénomènes peuvent se produire contre elles par exemple dans le cas de l'épictèse.

g) Théorie de l'épictèse.

L. LAPICQUE, sous le nom d'*épictèse* (acquisition en excédent), a montré que : « dans les échanges de substances dissoutes, la diffusion et l'osmose semblent intervenir plutôt comme résistance que comme forces déterminantes. Il y aurait donc lieu de considérer, dans les cellules, l'existence d'une fonction, dont le mécanisme est à chercher dans les phénomènes d'imbibition et de désimbibition et ayant pour effet de surmonter les équilibres de diffusion et d'osmose et de provoquer l'accumulation de certains éléments du milieu extérieur ». (⁸⁷)

L. LAPICQUE explique le transport des ions du milieu extérieur dans le suc vacuolaire par un brassage du protoplasme grâce auquel les micelles de ce dernier se chargeraient à l'extérieur, dans un milieu plus alcalin que le milieu vacuolaire, pour se décharger dans ce dernier. L'énergie nécessaire à ce brassage pourrait être produite par les phénomènes respiratoires. (⁸⁷)

Cette explication d'un phénomène physiologique nous semble préférable à celle qui voudrait que certains faits soient considérés comme liés à la vie sans autre précision.

M. DEVAUX approuvant la théorie de l'épictèse s'exprime ainsi : « Un fait général ressort avec évidence de toutes ces recherches : c'est l'existence d'une rétention non osmotique des substances par les tissus vivants des plantes et des animaux. Nous avons ici les manifestations d'une attraction pure et simple par certaines substances de la cellule,

« La *réten-tion par attraction* est un mode de fixation au moins aussi important que l'emprisonnement dans un sac hémiperméable. Elle constitue un phénomène au reste beaucoup plus simple plus direct tout à fait comparable aux affinités chimiques ; c'est la démonstration, avant la lettre des vues nouvelles présentées par M. LAPICQUE ». ⁽³¹⁾

Au cours de nos travaux, nous n'aurons pas à faire état de la théorie de l'épictèse car ils portent sur le milieu intérieur qui est un liquide global provenant d'un organe entier ou d'un ensemble d'organes.

Mais il nous a cependant semblé nécessaire de rappeler ce phénomène qui permet de comprendre certains faits d'une importance primordiale et qui, à première vue, semblent être en opposition absolue avec un principe fondamental de la physiologie cellulaire.



METHODE OPERATOIRE

Avant d'exposer les résultats de nos analyses et les conclusions qui paraissent en découler, nous allons exposer sommairement la méthode qui a été suivie pour obtenir ces résultats.

Les opérations auxquelles il est nécessaire de procéder sont les suivantes :

- 1° Prise de l'échantillon sur le terrain;
- 2° Préparation de l'échantillon au laboratoire ;
- 3° Analyse chimique de l'échantillon préparé.

a) **Prise de l'échantillon sur le terrain.**

Nous sommes ici en grande culture dans des fermes modernes où les diverses opérations ont lieu mécaniquement : épandage des engrais, ensemencements, etc... L'aspect des cultures présente une homogénéité remarquable qui facilite le prélèvement des échantillons. Comme l'étude des rendements a été faite à la ferme en comparant des parcelles étendues, nous laisserons cette opération de côté.

Nous avons, le plus souvent, dans ces exploitations, opéré sur des carrés de surfaces limitées mais rigoureusement soumis aux opérations de la pratique agricole courante.

D'autre fois, au Parc Saint-Maur, nos essais ont porté sur des surfaces beaucoup plus réduites mais traitées comme elles l'auraient été en grande culture.

Nous n'avons pas procédé à l'analyse des racines, pleine d'incertitude, en raison des particules ultra-fines de terre fixées sur les radicules et les poils absorbants. Les plantes ont été coupées au ras du sol et les divers échantillons ont été pesés à l'état frais immédiatement et soigneusement emballés.

b) La méthode du bouillon.

Comme nous l'avons déjà dit, nous avons utilisé la méthode du bouillon du professeur L. LAPICQUE.

Nous avons opéré, la plupart du temps, sur les feuilles, laboratoire de la plante.

Préparation de l'échantillon au laboratoire. — Les différentes feuilles d'une même plante n'ont pas la même composition. Il nous a paru beaucoup moins aléatoire de faire un échantillon moyen le plus parfait possible que de choisir certaines feuilles ayant une situation définie sur la plante, technique adoptée par LAGATU pour la vigne et qui se justifie pour cette plante spéciale.

De cet échantillon moyen on fait deux parties : l'une servira à déterminer l'eau de la plante en la desséchant à l'étuve à 100-110° et les différents dosages que l'on a à faire sur la plante entière ; l'autre servira à préparer le bouillon. Les poids de chacune de ces prises sont choisis en rapport avec les essais à pratiquer. D'une manière générale, pour le bouillon, nous prenons de 20 à 50 grammes et pour le poids sec et les essais subséquents de 10 à 20 grammes.

On fait le bouillon dans un vase en verre de bohème légèrement conique de 250 à 500 cc. dont on connaît le poids à l'état sec. On introduit dans ce vase une quantité d'eau représentant environ

trois fois le poids de substance fraîche utilisée pour le bouillon et on porte à l'ébullition. On fait alors tomber dans l'eau bouillante, par petites portions, la quantité de plante fraîche sur laquelle on opère, et cela sans arrêter l'ébullition; puis on la maintient légèrement pendant une demi-heure. On cesse de chauffer et on laisse en contact pendant trois à quatre heures et on pèse. Le poids ainsi obtenu représente le poids du vase, plus le poids sec de la plante employée, le reste représentant l'eau du bouillon. Comme on a déterminé d'autre part le poids sec de la plante, on obtient l'eau du bouillon par cette pesée. Le rapport du poids du bouillon au poids d'eau de la plante qui a servi à le confectionner, représente le *coefficient de dilution* du bouillon par rapport à la plante.

On recueille ce bouillon en prenant soin d'exprimer, à travers une fine étamine, la plus grande quantité possible de liquide. On suppose dans les calculs ultérieurs que le liquide qui imprègne encore la partie exprimée a la même composition que la partie extraite. Si la chose n'est pas tout à fait exacte, l'erreur est minime et n'est, en rien, comparable à celle que l'on commet quand on procède, par pression, à l'extraction directe des jus sur les tissus contusés.

Pour bien préciser les idées, nous allons donner les chiffres correspondant à une opération.

Sur feuilles de pomme de terre. — Poids sec sur 10 gr.

Bouillon sur 50 gr.

Tare du vase : 75 gr. 2.

Poids sec des 10 gr. = 1 gr. 270, soit sur 50 gr.
 $1 \text{ gr. } 27 \times 5 = 6 \text{ gr. } 35.$

Poids du vase après bouillon avant expression :
227 gr. 9.

L'eau du bouillon est :

$$227,9 - (75,2 + 6,35) = 141,75$$

correspondant à 6 gr. 35 de poids sec.

L'eau de la plante pour 50 gr. est :

$$50 - 6,35 = 43,65.$$

Le coefficient de dilution est $141,75 : 43,65 = 3,24$.

La quantité d'eau qui convient le mieux pour une opération correcte correspond à un coefficient voisin de 3. Le bouillon est filtré afin d'éliminer les débris végétaux et les poussières adhérentes aux tissus.

Exemple d'une détermination de Δ cryoscopique.

— Le δ mesuré sur le bouillon a donné $0^{\circ}325$, on conclut que le Δ du suc de la feuille est

$$0,325 \times 3,24 \text{ (coeff. de dil.)} = 1^{\circ}05;$$

Le passage au Δ du suc par ce moyen n'est pas rigoureusement exact ainsi que l'a signalé L. LAPICQUE, mais il donne une approximation suffisante dans les essais comparatifs que comportent nos expériences.

Partie soluble et partie insoluble. — La partie soluble est le bouillon, il n'y a pas à cet égard de difficulté. Comment étudier la partie insoluble ?

Nous avons procédé de deux façons : 1° Nous avons fait la détermination du poids sec de la plante totale sur un échantillon homogénéisé aussi parfaitement que possible avec celui qui a servi à faire le bouillon et nous avons ensuite déterminé l'extrait sec du bouillon. La différence correspond à la partie insoluble.

2° Le résidu du bouillon, après expression, contenu dans le nouet de fine étamine, est lavé à plusieurs reprises avec de l'eau distillée et exprimé

ensuite; lorsque ce résidu ne semble plus rien céder à l'eau, on l'exprime énergiquement et on dessèche à l'étuve. Lorsque le poids du résidu est devenu invariable, on le pèse et on obtient ainsi le poids de la partie insoluble.

Par cette méthode, il se produit assez souvent des pertes par suite des diverses opérations auxquelles est soumise la matière. Elle constitue toutefois un moyen de contrôle intéressant.

c) Techniques analytiques.

Chlorures. — Nous avons dosé les chlorures sur les cendres obtenues par une incinération ménagée et pesé du chlorure d'argent. BERTHELOT a étudié ce procédé qu'il a utilisé dans certaines de ses recherches.

Sulfates. — Pour les sulfates et les phosphates, nous avons utilisé la méthode de JOULIE ⁽³⁴⁾ (destruction de la matière végétale par l'acide azotique fumant en présence d'azotate de potasse) dans notre étude sur le blé. Mais, tenant compte d'une vieille observation de BOUSSINGAULT, faite à propos de trèfle, plante aux cendres alcalines, nous avons dosé les sulfates par la méthode classique sur les cendres du bouillon dans tous les cas où elles étaient alcalines.

BOUSSINGAULT a dit : « J'ai dû nécessairement examiner si les cendres contiennent à l'état de sulfates, la totalité du soufre préexistant dans la plante incinérée.

« Après avoir déterminé aussi exactement que possible la quantité de cendres laissées par la plante saine et en avoir dosé l'acide sulfurique, j'ai pris un poids connu de même foin que j'ai brûlé dans un vase de platine à l'aide d'un mélange de chlorate et

de carbonate de potasse. J'ai alors cherché l'acide sulfurique dans le produit de cette combustion.

1.000 parties de plantes ont donné directement 3 d'acide sulfurique et par l'analyse des cendres 2,8 (soit 6,66 d'erreur).

Ainsi des cendres alcalines retiennent tout le soufre qui préexistait dans la plante qui les a fournies. » ⁽²¹⁾.

Dans le cas du bouillon, il semble que celui-ci contient surtout du soufre oxydé, et qu'en incinérant l'extrait qu'il laisse à l'évaporation, dans les cas où les cendres obtenues renfermaient des carbonates alcalins, il y avait encore moins de chances de pertes de soufre que lorsqu'on calcinaït la plante complète avec ses tissus organisés.

Pour plus de sécurité, nous avons comparé les résultats obtenus dans le dosage sur les cendres avec ceux fournis par la méthode de JOULIE. La perte à l'incinération a été seulement de 6,06 % dans la feuille de betterave et de 7,8 % pour la racine. R. ECHEVIN qui a expérimenté la méthode de JOULIE, aboutit à cette conclusion : la méthode d'oxydation par l'acide nitrique permet d'effectuer le dosage du soufre dans les tissus végétaux avec une approximation ne dépassant pas 5 % d'erreur. ⁽²⁰⁾

Il apparaît donc que, s'il est avéré que des pertes de soufre et de phosphore ont lieu lorsqu'on opère par la calcination, ces pertes sont très réduites dans le cas de plantes à cendres très alcalines et que, dans l'appréciation des travaux anciens, cette alcalinité devra être prise en considération.

Ainsi s'explique la différence considérable obtenue dans les nombres fournis par BOUSSINGAULT sur le trèfle avec 6 % de pertes pour le soufre et ceux de JOULIE pour le grain de blé à cendres non alcalines

où la perte est de 55.4 %. Les pertes également très élevées signalées par SILBERSTEIN tiennent probablement à la même cause.

Phosphates. — Nous en avons opéré le dosage soit sur les cendres, soit sur le produit de l'attaque par le procédé JOULIE dans le cas du blé en adoptant le procédé rapide de précipitation à l'état de phosphomolybdate.

Quand on veut déterminer un nombre avec précision, on précipite à l'état de phosphate ammoniacomagnésien suivi d'un titrage à l'urane selon la méthode indiquée par JOULIE, procédé qui a reçu une confirmation récente de M. ECHEVIN dans le travail déjà cité.

L'introduction, dans notre évaluation de la minéralisation du bouillon, de l'acide phosphorique calculé comme nous l'avons fait, suppose qu'il existe dans le bouillon, sous la forme de phosphates, hypothèse de première approximation, à éclairer dans les travaux ultérieurs. Les faibles variations des phosphates ainsi calculés laissent subsister, en dehors d'eux, le mécanisme de compensation entre les autres anions.

Acides organiques du bouillon (dosés par l'alcalinité réduite). — La quantité de cendres provenant d'un poids déterminé de plante est additionnée d'un excès d'acide sulfurique titré, puis on chauffe légèrement pour faciliter la réaction. Après refroidissement, on ajoute de l'héliantine et avec de la soude, on détermine l'excès d'acide versé d'où la quantité correspondante à l'alcalinité des cendres de la prise d'essai.

Quelles sont les substances contenues dans les cendres qui présentent une réaction alcaline vis-à-vis de l'héliantine ? Il y a d'abord les *carbonates*

alcalins et alcalino-terreux provenant de la calcination des sels organiques, les *silicates* et les *orthophosphates* pour les deux valences acides faibles de l'acide phosphorique dans la mesure où elles se sont saturées pendant la calcination.

LIEBIG avait déjà fait cette remarque pour les phosphates et, dans ces analyses, les phosphates alcalins des *pois* et des *haricots* étaient considérés et calculés comme *sels tribasiques* ; ceux des céréales comme *sels bibasiques*. Dans le cas des cendres de blé l'alcalinité des cendres est faite principalement des phosphates bibasiques et des silicates et, dans le cas de la betterave, cette alcalinité est due en grande partie aux *carbonates alcalins*.

Au lieu d'utiliser la méthode par différence indiquée ci-dessus on pourrait arriver, en opérant par la méthode directe, à séparer approximativement de l'autre la partie cette *alcalinité complexe* qui fait effervescence avec l'acide.

d) Méthode d'évaluation des résultats.

Les résultats de nos dosages ont été évalués en *équivalents électrolytiques* par litre d'eau de la plante.

Pour bien faire comprendre cette évaluation, supposons que dans le dosage des chlorures on ait trouvé un poids de chlorure d'argent de 62 grs 5 rapporté au litre de bouillon. Le poids moléculaire de $\text{AgCl} = 143,5$. Dans l'échantillon considéré on a $\frac{62,5}{143,5}$ équivalents électrolytiques = 0,435.

Si l'on veut le poids de $\text{Cl} = 35,5$ correspondant, il suffit de faire le produit $0,435 \times 35,5$. Si on voulait

évaluer en acide chlorydrique $\text{HCl} = 36,5$, on aurait $0.435 \times 36,5$ en $\text{NaCl} = 58,5$ on aurait $0.435 \times 58,5$.

Pour les sulfates, la molécule d'acide sulfurique ayant 2 atomes d'H remplaçables, pour avoir l'équivalent électrolytique, il faut diviser le poids moléculaire par 2.

Ainsi $\text{BaSO}_4 = 233$ l'équivalent électrolytique est $233 : 2 = 116,5$. Si on a 7 gr. de sulfate de baryte au dosage des sulfates, ce dernier exprimé en équivalents électrolytiques donnera $\frac{7}{116,5} = 0,060$.

En adoptant le coefficient 0,043 pour la transformation du Phosphomolybdate en P^2O^5 en tenant compte de ce que $\text{P}^2\text{O}^5 = 142$ correspond à 2 PO_4H^3 , c'est-à-dire à 6 équivalents électrolytiques, si on a un poids de 167 gr. de phosphomolybdate par litre de bouillon celui-ci correspond à

$167 \times 0,043 = 7,181$
de P^2O^5 ; en équivalents électrolytiques

$$\frac{7,181 \times 6}{142} = 0,303$$

Les acides ainsi mesurés le sont avec une unité qui mesure la capacité de saturation vis-à-vis des bases, ce qui rend les nombres tout à fait comparables puisqu'ils expriment une fraction de normalité.



PREMIÈRE PARTIE

LE ROLE DE L'ION CHLORE DANS LES VÉGÉTAUX

L'emploi de plus en plus considérable des engrais potassiques chlorurés nous a naturellement amené à étudier, avec une attention particulière, l'action de ces engrais qui nous semblait parfois confuse et à les comparer à d'autres engrais potassiques notamment au sulfate de potassium dont l'emploi est aussi très répandu.

Pour donner une idée de l'importance de la question dont nous avons absorbé l'étude, nous reproduisons ci-dessous les chiffres relatifs aux consommations françaises d'engrais potassiques chlorurés avant 1914 et depuis le traité de Versailles.

1913	120.000 tonnes (environ).
1921	252.805 —
1925	448.173 —
1930	667.151 —

Avant d'exposer les résultats des travaux que nous avons entrepris, il nous semble nécessaire de rappeler sommairement l'état des connaissances actuelles sur le rôle du chlore dans la végétation.

I. — HISTORIQUE SOMMAIRE DES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE RÔLE DU CHLORE DANS LA VÉGÉTATION.

Les sols agricoles renferment naturellement peu de chlorures. Ceux que l'on y rencontre sont apportés par les engrais ou par les vents marins. Nous entendons parler des terres ordinairement cultivées et non des terres exceptionnelles qui renfermant des chlorures en raison de certains dépôts marins sont par des procédés appropriés progressivement conquises à la culture.

Le chlore ne semble pas être un élément plastique et les anciens agronomes ne se sont préoccupés de le rechercher que lorsque le voisinage de la mer les y amenait. Cependant BERTHELOT, qui avait décelé la présence de l'iode dans certains composés organiques du varech et du corps thyroïde, par exemple, avait fait quelques réserves au sujet du chlore mais n'était pas parvenu à démontrer sa présence dans les composés organiques des végétaux. ⁽³⁾

P. LESAGE qui a consacré de longues études à l'influence des chlorures sur le développement des végétaux, a démontré leur influence sur la formation de l'amidon dans les cellules à chlorophylle et l'obstacle qu'ils opposent à la formation de cet amidon s'ils sont en trop grande quantité. ⁽⁴⁾

MALAGUTI et DUROCHER, à la suite de leurs analyses faites sur des plantes poussées en Bretagne, concluent que le chlore est un des éléments qui présentent le plus d'inégalités dans les plantes de la même famille, qu'il y a sans doute beaucoup de cas où le dépôt des chlorures dans le tissu des plantes n'est qu'un fait accidentel et ne constitue pas un caractère inhérent à l'organisation du végétal. Ainsi, dans les cendres de deux échantillons de *trifolium pratense*, ils ont trouvé à l'analyse chez celui que l'on avait

cueilli sur un sol argilo-schisteux 4 %, chez l'autre cueilli en terrain calcaire près de 20 % de Cl, c'est à dire *cinq fois plus, sans qu'il y eût des différences notables dans l'aspect des deux éléments analysés* » ⁽⁴⁰⁾.

En général, dans les cendres des plantes herbacées de Bretagne, le chlore entre dans la proportion de 4 à 8 %. Parfois elle s'élève jusqu'à dépasser 20 % mais dans des cas exceptionnels.

D'ailleurs, il y a des familles où l'abondance du chlore semble être un caractère général : ainsi les cendres des crucifères en contiennent en moyenne 11,24 %, celles des prémulacées de 8 à 20 %, celles des graminées de 8,78 à 12,68 %.

JOULIE dans son « *Mémoire sur les céréales* » dit : « Le chlore n'existe généralement qu'en très faible quantité dans les plantes cultivées et ne s'y trouve guère qu'à l'état de chlorure de sodium absorbé accidentellement. Aussi son dosage ne présente-t-il qu'un intérêt très secondaire et peut-il être négligé dans la plupart des cas. Il ne devient utile que pour certaines plantes qui jouissent de la faculté d'absorber assez largement le chlore telles que la betterave et en général les plantes marines ». ⁽³⁴⁾.

ISIDORE PIERRE dit : « Les bons effets du sel sur les récoltes, admis par les uns, contestés par les autres, ne sont pas établis d'une manière suffisamment incontestable pour que l'on puisse recommander l'emploi du sel sur les terres autrement qu'à titre de simple expérience » ⁽⁶⁷⁾

NOBBE, WAGNER et ASCHOFF ont montré que les haricots et le maïs ne peuvent fructifier que dans des solutions renfermant du KCl et du $\text{Fe}^2 \text{Cl}^3$.

DEHERAIN dans son traité de chimie agricole (p. 167) rappelant les observations de quelques agronomes et notamment de GASPARI dit qu'elles « sont

de nature à montrer que les chlorures ont une influence heureuse sur la migration des principes immédiats ».

ANDRÉ dit que « la présence du chlore dans les conditions naturelles est presque universelle ». Beaucoup de plantes ne fructifient pas en l'absence de cet élément qui est souvent capable de jouer, même en très faible quantité, un rôle des plus utiles » ANDRÉ ajoute : « Peut-être appartient-il à la classe des corps stimulants » (*).

MOLLIARD dit : « Le chlore ne paraît jamais constituer de composés organiques dans la plante et les chlorures ont, le plus fréquemment, pour unique fonction d'élever le pouvoir osmotique des végétaux qui se développent dans l'eau salée et leur permettre ainsi de maintenir leur turgescence ». (64)

En résumé la plupart des agronomes semblent considérer que l'anion Cl n'exerce sur la végétation qu'une action secondaire d'ailleurs, incertaine et estiment que l'emploi des chlorures ne paraît pas avoir d'intérêt essentiel si on les considère en dehors de leurs cations.

II. — BUT DE NOS RECHERCHES

Le statut des chlorures, principalement des sylvinites et du chlorure de potassium, ne s'est établi que récemment dans les champs d'expériences et de démonstrations et dans la culture.

Des expériences nombreuses et rigoureusement contrôlées ont permis de déterminer les doses optima des divers sels chlorurés de potassium qu'il faut employer et les époques auxquelles il faut les employer. Nous nous proposons d'apporter, à cet effet, les résultats de nombreux essais.

Nous essayerons de tirer de nos expériences de laboratoire des conclusions qui apporteront une première contribution au *statut du chlore dans le milieu intérieur des plantes*.

Les chlorures existent dans la plante d'une façon plus ou moins accidentelle, mais quand on introduit des chlorures sous formes d'engrais on peut penser que ceux-ci joueront dans la vie végétale un rôle analogue à celui qu'ils jouent dans la vie animale pour la réalisation des équilibres osmotiques et que, dans ces conditions, ils peuvent déterminer dans la vie de la plante des conditions optima qui ne sont pas aussi facilement réalisables avec les autres anions. Ces conditions optima peuvent tenir à la petitesse de l'anion Cl et à sa monovalence.

Les études que nous avons poursuivies nous ont amené à des résultats dont il semble possible de conclure que l'anion Cl joue, comme nous le verrons, un rôle important dans le développement des végétaux cultivés.

Nos essais ont été faits, d'une manière générale, en pleine terre végétale. Ils ont revêtu, parfois, le caractère de véritables essais culturaux, portant sur d'assez grandes surfaces et effectués dans les conditions ordinaires de la pratique agricole.

Mais les exploitations sur lesquelles avaient lieu ces essais sont très bien cultivées et régulièrement fumées depuis de nombreuses années. C'est-à-dire que malgré leur caractère pratique nos essais avaient lieu, cependant, avec une rigueur suffisante. Les résultats qui en découlent nous paraissent d'autant plus concluants.

Nous allons examiner successivement les divers résultats obtenus au laboratoire, mais il nous semble, au préalable, nécessaire de rappeler que nous opérons sur ce que nous appelons le milieu intérieur

des plantes, c'est-à-dire sur le bouillon obtenu par la méthode du professeur L. LAPICQUE.

D'ailleurs le Cl n'entre pas dans la composition des principes immédiats élaborés par les plantes. C'est dire que nous trouvons dans le bouillon à peu près tout le Cl contenu dans le végétal.

Nos résultats sont donnés en *équivalents électrolytiques par litre d'eau* de la plante, suivant les directives du professeur LAPICQUE, toutes les fois que nous avons eu à nous occuper de l'équilibre osmotique.

III. — LES QUANTITES DE CHLORE CONTENUES DANS LE MILIEU INTERIEUR DES PLANTES DEPENDENT DES DOSES D'ENGRAIS CHLORURES QU'ON MET A LEUR DISPOSITION.

Essais. — Ils ont porté sur des plantes de familles différentes. Nous avons toujours constaté que l'apport d'engrais chlorurés avait pour conséquence l'augmentation des quantités de chlore dans le milieu intérieur.

1° *Sur le blé.* — Les essais ont porté sur des parcelles ayant chacune un are de superficie.

Ces parcelles avaient été prises dans une pièce bien préparée et fumée de façon homogène.

Les engrais appliqués étaient les suivants :

I — Parcelle témoin;

II — 1.000 kg de sylvinite riche à l'hectare ;

III — 1.000 kg de chlorure de potassium à l'hectare.

Les échantillons ont été prélevés dans des conditions aussi semblables que possible en Mai et en Juillet, de manière à rendre les résultats comparables,

Les quantités de chlore trouvées, en équivalents électrolytiques, sont les suivants :

	PRÉLÈVEMENT DE MAI	PRÉLÈVEMENT DE JUILLET
Témoin	0,0169	0,0343
1000 kg de sylvinite à l'Ha....	0,150	0,0598
1000 kg KCl	0,1309	0,042

Ces résultats sont intéressants car ils montrent que si dans le témoin sans chlorures les doses de chlore ne diminuent pas, dans les parcelles à chlorures elles sont très inférieures en Juillet à ce qu'elles étaient en Mai. Plusieurs hypothèses peuvent être faites :

1° Les mois de Mai et de Juin ayant été pluvieux le chlore du sol a été lessivé par les eaux de pluie et entraîné dans les eaux de drainage et n'a plus continué de pénétrer dans la plante alors qu'elle continuait de s'accroître.

2° La nature des tissus analysés n'était pas la même en Juillet et en Mai. En Mai, en effet, tous les organes de la plante étaient verts et avaient à peu près la même composition et les feuilles d'ailleurs avaient une importance prépondérante. En Juillet la différenciation entre le chaume et les feuilles s'est accentuée et l'importance des feuilles est proportionnellement moins grande.

2° *Sur navets et haricots.* — Sur ces deux plantes les analyses de feuilles également sur bouillon ont donné les teneurs de chlore suivantes :

	NAVETS	HARICOTS
Avec SO ⁴ Ca	0,008	0,0108
Avec SO ⁴ K ²	0,0176	0,0516
Avec K Cl	0,221	0,264

Ces deux essais montrent que le navet et le haricot n'ont pas pour le chlore la même prédilection que le blé mais que cependant l'apport d'engrais chlorurés augmente dans des proportions considérables les teneurs en chlore.

3° *Sur betterave demi sucrière.* — Les essais ont eu lieu au Parc St-Maur. On sait que la betterave est une plante originaire des bords de la mer et capable, par conséquent, d'absorber d'assez grandes quantités de chlorures.

Les essais comprenaient six parcelles :

I. — 500 kg nitrate de soude	+	1.000 kg. superphosphate	+	500 KCl
II. — —	+	—	+	1000 KCl
III. — —	+	—	+	1500 KCl
IV — 1000 K nitrate	+	2000 K super	+	1500 KCl
V — 1500 K —	+	3000 K —	+	1500 KCl
IV — Témoin, sans engrais.				

Les résultats des analyses qui cette fois sont rapportés au % de matière sèche sont les suivants en ce qui concerne les *teneurs en chlore* toujours calculés en équivalents électrolytiques et sur un kilogramme de matière sèche.

	I	II	III	IV	V	VI
Feuilles	1,756	4,062	3,274	2,858	2,09	0,327
Racines	0,192	0,449	0,435	0,491	0,362	0,063

1°) Il existe une très grande différence de teneurs en chlorures entre les feuilles et les racines de la parcelle témoin et celles des autres parcelles.

2°) Il existe une très grande différence aussi entre les feuilles et les racines au point de vue de leur teneur en chlore. C'est un fait connu, en effet, que la minéralisation des feuilles est de beaucoup supérieure à celle des racines.

3°) Il existe une dose d'engrais chlorurés au delà de laquelle la teneur en chlorures des feuilles et des racines diminue au lieu d'augmenter. Dans notre expérience la dose maxima de HCl est de 1.000 kg à l'Ha.

IV. — LES CHLORURES JOUENT UN ROLE OSMOTIQUE IMPORTANT DANS LES PLANTES

La propriété du chlore d'augmenter la pression osmotique dans les plantes est généralement admise mais non précisée. Au cours de quelques essais que nous avons faits, nous avons pu mettre en relief cette action des engrais chlorurés pour le blé et pour l'avoine.

La pression osmotique est, dans nos essais, mesurée par le Δ cryoscopique.

Sur blé

I Témoin	1°
II 1.000 kg sylvinite	1° 04
III. 1.000 kg KCl	1° 13

Sur avoine

I Témoin	1° 05
II. 900 kg KCl	1° 09

Cette influence des chlorures sur la pression osmotique a un grand intérêt au point de vue purement physiologique et une grande importance au point de vue technique.

On sait que la croissance des plantes est en relation directe avec la pression osmotique qui dépend de la composition moléculaire globale du milieu intérieur des feuilles (⁹⁹). Il en résulte que les rendements des cultures sont en rapport avec la pression osmotique et par conséquent avec les apports de chlorures faits à la plante.

Mais l'augmentation de la pression osmotique provoquée par l'apport des sels chlorurés peut être due aussi bien à l'anion Cl qu'au cation K dans la sylvinite et le chlorure de potassium. Elle est probablement due aux deux à la fois.

Dans une autre partie de notre étude nous citerons des exemples de fumures chimiques qui montreront que le chlorure d'ammonium donne des résultats très sensiblement supérieurs à ceux que l'on obtient avec le sulfate d'ammoniaque pour des doses égales d'azote mises à la disposition des plantes.

De même le chlorure de potassium donne des rendements supérieurs à ceux que l'on obtient avec le sulfate de potassium pour des doses égales de potassium.



DEUXIÈME PARTIE

COMPARAISON ENTRE LES QUANTITÉS D'IONS Cl ET SO_4 QUI ENTRENT DANS LA COMPOSITION DU MILIEU INTÉRIEUR DES PLANTES

I — HISTORIQUE SOMMAIRE DES TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE RÔLE DU SOUFRE DANS LA VÉGÉTATION.

En étudiant les variations de la teneur en Cl des plantes cultivées sous l'influence des engrais chlorurés nous avons été conduits à examiner également leur teneur en ion SO_4 qui est la forme principale sous laquelle le soufre est apporté aux végétaux.

Le soufre est un élément plastique; il entre, en effet, dans la constitution de la molécule albuminoïde dans la proportion de 1.5 % environ.

Il pénètre dans le milieu intérieur de la plante principalement à l'état de sulfates et notamment de sulfate de chaux que l'ion trouve en quantités plus ou moins importantes dans la plupart des terres cultivées. L'eau peut dissoudre jusqu'à 3 gr. de sulfate de chaux par litre.

On ne s'est jamais guère préoccupé de la présence du sulfate de chaux dans le sol qui, d'une manière générale, en contient toujours. Cependant on apporte quelquefois du plâtre à la terre portant certaines cultures, notamment des légumineuses, comme la luzerne et le trèfle. Mais les résultats peuvent être rapportés à la fois à l'action du calcium et à celle du soufre puisque les légumineuses qui sont riches en chaux sont aussi riches en matières protéiques et par conséquent en soufre.

Dans son « Economie rurale » BOUSSINGULT s'exprime ainsi qu'il suit comme conclusion à une sorte d'enquête sur le plâtrage qu'il avait entreprise : « Il semble hors de doute que le soufre que les plantes exigent, elles le rencontrent surabondamment dans les terrains amendés avec les engrais ordinaires comme cela a lieu dans les cultures de céréales, des racines et des tubercules ». ⁽²¹⁾

Nous savons aujourd'hui que l'action du plâtre est due à l'action des deux ions CaO et SO^4 . A la suite de ses recherches récentes, sur l'action du soufre sur la végétation, M. Gabriel BERTRAND a été amené à se demander si certaines terres cultivées n'auraient pas été épuisées en soufre et s'il ne faudrait pas leur en apporter.

Il y a lieu de considérer, qu'en réalité, il est apporté au sol, sous forme de sulfates divers, des quantités parfois importantes de soufre. Les sulfates d'ammoniaque et aussi le sulfate de chaux seul ou en mélange, dans la proportion d'environ 50 % dans le superphosphate, apportent au sol des quantités de soufre suffisantes pour faire face aux besoins des plantes cultivées.

Suivant la nature du sol c'est l'anion SO^4 ou le cation Ca qui agira surtout ou les deux ensemble. Il importe, par conséquent, de connaître la composition du sol sur lequel a lieu l'expérience.

Ainsi que nous l'avons dit le sulfate de chaux est soluble dans l'eau qui en est saturée quand elle en contient 3 gr. Cette solubilité est relativement faible : c'est ce qui explique que ce corps ne disparaît pas rapidement des sols. Lorsque les diverses substances apportées comme engrais ont été absorbées en totalité il reste encore dans les eaux du sol du sulfate de chaux et du carbonate de chaux. C'est la raison d'être de la présence de quantités assez importantes, parfois, de sulfates et de chaux dans les feuilles à la fin de la végétation.

Le sulfate de potasse étant très soluble on peut redouter qu'il exerce une action nocive sur les racines lorsqu'elles sont en contact avec une solution concentrée de ce sel. Nous avons eu l'occasion de constater, d'ailleurs, cette action sur des plantes de trèfle en plein développement, au mois de Mai, en employant l'engrais à forte dose en couverture. Mais lorsque le sulfate de potasse est enfoui, les colloïdes du sol, argile et humus, diminuent, dans une très forte mesure sa solubilité et atténuent par conséquent ses inconvénients.

Nous avons suivi dans quelques unes de nos expériences la pénétration de l'ion SO^4 dans le milieu intérieur de quelques plantes agricoles en présence de l'ion Cl.

Mais nous allons montrer qu'il résulte de ces diverses expériences :

1° Que l'ion Cl monovalent se trouve, dans le milieu intérieur des plantes, en plus grandes proportions que l'ion SO^4 divalent et que, pour certaines d'entre elles, comme la betterave, d'origine maritime, l'absorption peut être massive.

2° Que de fortes applications de chlorures peuvent être dangereuses pour les plantes l'ion Cl ayant tendance à éliminer l'ion SO^4 .

II. — L'ION Cl MONOVALENT SE TROUVE GÉNÉRALEMENT EN PLUS GRANDES PROPORTIONS QUE L'ION SO^4 DANS LE MILIEU INTÉRIEUR DES PLANTES.

A doses égales de potasse quand on emploie des engrais potassiques, chlorure et sulfate, de manière à réaliser dans les tissus de la plante les *proportions maxima* d'ions Cl et d'ions SO^4 on constate, en traduisant les résultats en équivalents électrolytiques, que l'ion Cl est contenu en plus grandes quantités que l'ion SO^4 dans le milieu intérieur.

Nos essais. — Ils ont eu lieu en pleine terre dans des conditions qui se rapprochent des conditions ordinaires de la culture. Ils ont porté sur des plantes agricoles de familles différentes de manière à vérifier si les ions Cl et SO^4 se comporteraient de la même manière.

Dans ce but nous avons employé KCl et SO^4K^2 de manière à pouvoir déduire les quantités d'ions Cl et SO^4 en traduisant les résultats en équivalents électrolytiques.

Sur betterave demi-sucrière

Les fumures appliquées étaient les suivantes.
(Nous rappelons ces essais que nous avons déjà cités)

1°	500 kg de nitrate de soude	+	1000 kg superphosphate	+	500 k KCl
2°	—	—	+	—	—
3°	—	—	+	—	—
4°	1000 —	—	+	2000 —	—
5°	1500 —	—	+	3000 —	—
					+ 1000 k KCl
					+ 1500 k KCl
					+ 1500 k KCl
					+ 1500 k KCl

Dans 5 parcelles contigües aux précédentes on avait appliqué les mêmes doses de nitrate de soude et de superphosphate mais on avait remplacé le chlorure de potassium par du sulfate de potassium de façon qu'il y eût dans les parcelles correspondantes les mêmes doses de K^2O .

Les résultats évalués en équivalents électrolyti-

ques ont été les suivants calculés sur les feuilles entières et ramenés à un litre d'eau de la plante.

	TÉMOIN	1°	2°	3°	4°	5°
		KCl SO ⁴ K ²	KCl SO ⁴ K ²	KCl SO ⁴ K ²	KCl SO ⁴ K ²	KCl SO ⁴ K ²
Chlorures .	0,327	1,736-0,975	4,062-1,372	3,274-0,766	2,858-0,488	2,09 -0,209
Sulfates ..	0,918	0,326-0,214	0,867-0,523	0,515-0,523	0,480-0,781	0,197-0,386

Ces résultats présentent un très grand intérêt au point de vue spécial des ions Cl et SO⁴.

Dans les trois premières parcelles si nous faisons le rapport

Cl DES PARCELLES A CHLORURE

SO⁴ des parcelles à sulfate

Nous trouvons les rapports :

$$\frac{1,756}{0,214} = 8,2 \quad \frac{4,062}{0,523} = 7,7 \quad \frac{3,274}{0,523} = 6,2$$

Dans les parcelles 4 et 5 les rapports deviennent

$$\frac{2,858}{0,781} = 3,65 \quad \frac{2,09}{0,386} = 5,41.$$

Il est à remarquer que dans ces parcelles les doses de sulfate ont été s'accroissant fortement par suite des apports considérables de sulfate de chaux faits par le superphosphate.

Il est à remarquer aussi que même dans les parcelles à sulfate de potasse et malgré les fortes doses de sulfate de chaux apportées par le superphosphate le chlorure des feuilles l'emporte sur le sulfate dans les trois premières parcelles. Le rapport $\frac{\text{Chlorure}}{\text{Sulfate}}$ est respectivement

$$\frac{0,975}{0,214} = 4,5 \quad \frac{1,372}{0,523} = 2,6 \quad \frac{0,766}{0,523} = 1,4$$

Dans les parcelles à sulfate 4 et 5 le rapport se renverse et le sulfate l'emporte sur le chlorure. Le rapport $\frac{\text{Chlorure}}{\text{Sulfate}}$ devient alors

$$\frac{0,488}{0,781} = 0,62 \quad \text{et} \quad \frac{0,209}{0,386} = 0,54.$$

Ces résultats confirment l'affinité particulière de la betterave pour les chlorures.

Sur pomme de terre « Royale de Vilmorin ».

L'essai a porté sur les fumures suivantes :

- 1° Tourbe + nitrate de soude + chlorure de potassium
- 2° Tourbe + nitrate de soude + sulfate de potassium

Les fumures ne différaient que par les engrais potassiques employés mais ces derniers étaient employés de façon que les quantités de K_2O fussent égales.

Les équivalents électrolytiques ramenés à 1 litre d'eau de la plante ont été les suivants :

Avec chlorure de potassium : ions Cl en équivalents électrolytiques 0,096

Avec sulfate de potassium : ions SO_4 en équivalents électrolytiques 0,0382

Sur maïs.

L'essai a porté sur la feuille de maïs récoltée le 1^{er} juillet 1930. Les fumures employées étaient exactement les mêmes que pour la pomme de terre.

Les résultats obtenus ont été les suivants :

Avec chlorure de potassium : ions Cl en équivalents électrolytiques 0,054

Avec sulfate de potassium : ions SO_4 équivalents électrolytiques 0,014

Sur navets.

Les doses maxima d'ions Cl et SO⁴ traduits en équivalents électrolytiques toujours rapportés à un litre d'eau de la plante sont les suivants :

Avec chlorure	0,221
Avec sulfate de potassium	0,152

Il n'est pas inutile de se rappeler qu'il s'agit en l'espèce d'une crucifère dont on sait la richesse particulière en composés organiques à base de soufre.

Sur haricots.

Dans les mêmes conditions que ci-dessus, nous arrivons aux résultats suivants :

Avec chlorure de potassium	0,264
Avec sulfate de potassium	0,0254
Avec sulfate de calcium	0,0274

CONCLUSIONS

Des chiffres qui précèdent, il est possible de conclure que dans les différents végétaux expérimentés la concentration des ions SO⁴ s'est montrée inférieure à la concentration des ions Cl, exception faite pour les deux derniers essais sur betteraves. Nous devons toujours penser à des absorptions électives possibles pouvant amener quelques exceptions. L'électivité de l'ion Cl pour la betterave est particulièrement remarquable et s'explique par les origines maritimes de cette plante.

L'ion Cl se trouve en plus grande quantité que l'ion SO⁴ dans le milieu intérieur des plantes probablement en raison de sa valence.

III. — DE FORTES APPLICATIONS DE CHLORURES PEUVENT ETRE DANGEREUSES POUR LES PLANTES

Nos essais. — Ils ont porté sur le blé et sur avoine dans les conditions ordinaires de la pratique agricole dans deux exploitations différentes.

Les engrais azotés et phosphatés avaient été répandus comme à l'ordinaire mais les engrais potassiques ont été apportés en mars. Les échantillons prélevés en fin mai et le 9 juillet ont été étudiés d'après la méthode des bouillons.

Les résultats ont été les suivants :

Expériences sur le blé

PRÉLÈVEMENT DE MAI	TÉMOIN	AVEC 1000 KG SYLVINITE	AVEC 1000 KG
Sulfates (de la partie soluble)	0,0124	traces	traces
Chlorures	0,0169	0,150	0,1309
PRÉLÈVEMENT DU 9 JUILLET			
Sulfates (de la partie soluble)	0,0183	traces	traces
Chlorures	0,0343	0,0598	0,042

Expériences sur l'avoine

	TÉMOIN	AVEC 1000 KG DE CHAUX	AVEC 900 KG KCl	AVEC 900 KG KCl
Sulfates (de la partie soluble)	0,0217	0,0215	traces	traces

Ces résultats ne peuvent être obtenus que par la méthode des bouillons car l'incinération donne un global dans lequel le phénomène se trouve atténué et même masqué.

Dans ces deux expériences on voit que l'addition, au printemps, de fortes doses d'engrais chlorurés faisant jouer dans la plante des quantités de chlorures importantes élimine presque totalement les sulfates dans le milieu intérieur sans pour cela empêcher une augmentation du rendement.

En effet, les petites doses de sulfates que la plante a absorbées après l'application des doses élevées de chlorures, ont été suffisantes pour faire face aux besoins du développement ultérieur de la plante. Mais, en cas de sécheresse, les solutions de sulfate de chaux disparaissant, il pourrait y avoir quelque danger.

D'autre part, certains sols peuvent être presque totalement dépourvus de soufre par suite des prélèvements effectués par les récoltes.

Il existe d'ailleurs une désulfatation progressive des sols peut-être plus continue que la décalcification. Les eaux de drainage renferment du $\text{SO}^4 \text{Ca}$ et il n'est même pas besoin de CO^2 dans le sol pour amener sa dissolution comme $\text{CO}^2 \text{Ca}$.

Dans le cas où les quantités de soufre dans le sol seraient très faibles, l'apport massif d'engrais potassiques chlorurés pourrait avoir des conséquences désastreuses pour les récoltes.

L'excès des chlorures naturels et notamment de chlorure de sodium dans un sol peut, en cas de sécheresse, présenter aussi des dangers pour la végétation.

C'est ce qu'ont constaté BERTHAULT et CROCHETTE en Algérie sur terre salée. Leurs conclusions sont en effet les suivantes :

1° Sur une terre salée, on peut obtenir de beaux froments mais la récolte du grain y est exposée à un dépérissement rapide quand les chaleurs surprennent la plante en pleine végétation.

2° Le froment végétant dans un terrain salé absorbe du chlorure de potassium et il en absorbe de fortes quantités (124 pour mille de la matière sèche) sans périr, mais c'est là une cause de ralentissement de l'activité végétale, ralentissement qui se traduit par une diminution de la quantité et de la qualité du produit. ⁽¹⁷⁾.

PICHARD a démontré qu'un antagonisme existe aussi entre les chlorures et les nitrates dans le tabac : « L'acide azotique dont le rôle est utile pour la plante ne l'emporte qu'à force de quantité, s'il diminue, le Cl augmente dans le tabac. » ⁽¹⁸⁾.

Dans de nombreux essais dont nous parlerons plus loin, nous avons nous-même constaté qu'à partir de certaines doses de chlorure, les rendements agricoles diminuaient au lieu de croître.



TROISIÈME PARTIE

PHÉNOMÈNES DE COMPENSATION DANS LA COMPOSITION MINÉRALE DU MILIEU INTÉRIEUR

I. — EXPOSE SOMMAIRE DU RÔLE DES ANIONS PO^4 , SiO^3 ET D'ACIDES ORGANIQUES DANS LE MILIEU INTÉRIEUR

En dehors des ions Cl et SO^4 , les autres anions que nous trouvons dans les sels du milieu intérieur en quantité notable sont PO^4 , SiO^3 et ceux des acides organiques.

Nous ne parlons pas des nitrates parce que, à l'époque de nos prélèvements, au moment où les plantes étaient en pleine végétation, ils n'existaient qu'à l'état de traces dans le milieu intérieur en raison de leur utilisation immédiate.

a) Acide phosphorique. —

Le phosphore est un élément de la cellule aussi important que la matière protéique base du protoplasma. Il est un élément fondamental des substances qui constituent le noyau.

Parmi les matières minérales plastiques, l'acide phosphorique occupe la première place. Sa principale caractéristique réside dans le fait qu'il n'est pas soumis, et il s'en faut, aux mêmes variations que le chlore et l'acide sulfurique. Cette remarque a déjà été faite par MALAGUTI et DUROCHER : « L'acide

phosphorique est susceptible de variations moindres que le chlore et l'acide sulfurique. On sait d'ailleurs que sa présence est indispensable pour permettre au végétal d'acquiescer un état complet de développement. Aussi la proportion de cet acide ne s'abaisse-t-elle pas à des quantités aussi faibles que celles du chlore ou de l'acide sulfurique. » ⁽⁴⁰⁾

JOULIE, dans un de ses mémoires sur la composition et les exigences des céréales, a résumé dans le tableau ci-dessous la proportion de chacun des corps minéraux qui entrent dans la composition du blé qui est précisément l'une des plantes que nous avons plus particulièrement étudiée.

Sur 100 parties de chacun des corps absorbés par le blé de belle venue, il en passe dans les grains les quantités suivantes :

EN MOYENNE	
Acide phosphorique	67,21
Azote	56,28
Magnésie	46,02
Acide sulfurique	25,84
Potasse	12,87
Chaux	7,89
Oxide de fer	3,74
Soude	2,90
Silice	0,53 ⁽⁴¹⁾

Mais tous ces travaux se rapportent à la plante globale ou à un tissu global.

Dans le bouillon, nous n'avons pas étudié les formes sous lesquelles on trouve le phosphore soluble de la plante. La plus grande partie est vraisemblablement oxydée. Mais est-ce sous la forme de phosphates alcalins, d'éthers phosphoriques ou de combinaisons plus complexes ? Sous toutes ces formes solubles, il semble que le groupement PO^4 existe tout constitué. Il y a donc toujours intérêt à en doser le global.

SCHLOESING a montré que les solutions ordinaires du sol sont pauvres en acide phosphorique dissous. Leur absorption par petites doses successives amène leur utilisation plastique immédiate au fur et mesure que croît le végétal. Mais leur richesse peut être accrue notablement par les additions d'engrais minéraux. Une partie d'ailleurs peut pénétrer dans le milieu intérieur par l'action des sécrétions acides des racines. ⁽¹²⁾

La teneur du milieu intérieur peut être importante même en partant de liquides du sol très étendus, il suffit que les solutions puissent se renouveler aux dépens des réserves du sol.

Il est certain que l'apport, dans le sol, d'importantes quantités de phosphates solubles peut augmenter la quantité d'acide phosphorique disponible pour la plante. Mais la rétrogradation des phosphates monocalciques du superphosphate et les phénomènes d'adsorption qui se produisent en présence de l'humus et de l'argile, substances colloïdales, toujours présentes en plus ou moins grandes quantités dans les terres cultivées, concourent pour empêcher de trop fortes concentrations des liquides du sol qui pourraient devenir toxiques.

b) Silice. —

Il existe un grand nombre de silicates mais on ne connaît vraiment bien que ceux qui dérivent de l'acide métasilicique $\text{SiO}^3 \text{H}^2$. La silice existe dans les eaux du sol à l'état de silicates alcalins. Elles en contiennent de manière constante environ 8 gr. par mètre cube. On doit donc s'attendre à en trouver dans tous les végétaux.

Elle existe toujours dans le blé dans des proportions assez fortes et elle y joue un rôle qui n'a pas encore été bien élucidé.

Dans son célèbre mémoire sur les céréales, JOULIE, dit, en parlant de la silice du blé : « La silice n'est que bien peu utile à la fructification si tant est qu'elle le soit puisqu'il n'en passe dans les grains que 1 % au plus de la quantité contenue dans la récolte entière: Les quantités absolues de silice contenues dans le grain sont d'ailleurs très faibles. » ⁽³⁴⁾

Il est curieux à ce sujet de noter qu'il a été possible de cultiver une autre graminée, le maïs, dans un milieu liquide absolument dépourvu de silice ⁽³⁵⁾. Il s'y est bien développé, a donné des graines qui ont permis de le reproduire normalement pendant quatre générations. C'est à un accident que l'on doit de n'avoir pas poursuivi sa culture.

Il est intéressant de constater qu'une graine issue de quatre générations cultivées sans silice dans l'eau a donné une plante vigoureuse et fertile quand on l'a semée dans un peu de terre végétale copieusement arrosée. Cette plante ne contenait en potasse qu'une proportion inférieure à un sixième de celle qui est fixée par une plante normale cultivée en pleine terre.

Il semble qu'il est possible de conclure de ces expériences que la silice peut être remplacée par une autre substance dans la plante et qu'elle jouerait un rôle important dans l'absorption de la potasse.

Les acides organiques combinés à des bases existent en plus ou moins grande quantité dans toutes les parties du végétal. On en trouve à l'état libre fréquemment dans le fruit et plus rarement dans les feuilles, les tiges et les racines.

c) Anions d'acides organiques. —

La plupart des anions qu'on trouve dans la plante proviennent de réactions qui se produisent au cours du métabolisme. Leur production doit être considérée au moins pour partie comme une réaction contre

l'alcalinisation du liquide intérieur et résulte de l'oxydation des hydrates de carbone.

Au nombre des réactions qui sont susceptibles de produire l'alcalinisation du milieu, nous pouvons citer la transformation de l'azote nitrique en azote organique, l'utilisation du gaz carbonique des bicarbonates dans la formation de matières organiques diverses; la précipitation de la silice des silicates. Les plantes qui poussent en milieu calcaire forment de grandes quantités d'acides organiques probablement pour réagir contre l'alcanisation du milieu intérieur.

M. MOLLIARD, étudiant une muscédinée, a montré qu'elle produit des acides organiques différents, résultant de l'oxydation du sucre interverti, suivant les conditions dans lesquelles la muscédinée est alimentée et notamment dans des milieux nutritifs déséquilibrés.

Dans un milieu équilibré, il ne se forme que des traces d'acides libres résultat normal du phénomène biologique d'oxydation des différents éléments chimiques. ⁽⁶⁵⁾

II. — LA REGULATION PHYSICO CHIMIQUE

Après l'étude simultanée des chlorures et des sulfates dans la minéralisation du milieu intérieur, qui nous a donné des indications intéressantes à la fois au point de vue théorique et au point de vue pratique, nous avons pensé à examiner l'ensemble des principaux sels qui constituent cette minéralisation dans leurs variations sous l'influence d'additions systématiques d'engrais.

Les plantes expérimentées étaient cultivées dans des parcelles contiguës sur lesquelles on appliquait les engrais suivants : sylvinite, chlorure de potassium, sulfates de potasse et de chaux, à doses importantes de façon à déterminer dans le milieu intérieur

les variations les plus étendues. *Les prélèvements d'échantillons pour comparaison avaient lieu aux mêmes jours et aux mêmes heures.* Cette précaution était strictement indispensable car nous avions, en vue l'étude de la concentration moléculaire globale du milieu intérieur, variable avec la température et les conditions météorologiques.

Les acides contenus dans les plantes sont salifiés. En dosant les anions et en les évaluant en équivalents électrolytiques on a des éléments qui, si on fait abstraction des différences de dissociation électrolytique dans une première approximation, sont comparables entre eux, et leur somme a une signification globale.

Nous avons constaté, comme nous allons le voir dans les nombres ci-dessous, une somme sensiblement constante, malgré les variations importantes dans la teneur en différents sels.

Ce résultat nous indique un mécanisme de compensations minérales.

a) Relation entre la matière minérale et la matière organique. —

L'idée de relier la quantité de matière minérale à la quantité de matière organique dans les plantes est ancienne. Les vieilles tables de WOLF portaient de cette conception.

MAQUENNE rappelle d'après PELLET que la somme des capacités de saturation des bases minérales contenue dans une même espèce végétale est sensiblement constante quelles que soient leurs proportions relatives. ⁽⁵²⁾.

MAZE a montré que pour le maïs, l'élaboration d'un poids déterminé de matière végétale exige un volume constant de solution minérale de composition déterminée. ⁽⁵³⁾.

J. CHAUSSIN, en suivant les idées et la méthode

des bouillons de L. LAPICQUE, a tenté de ramener sur le plan osmotique ces notions de première observation, en étudiant le milieu intérieur de la feuille.

Ses recherches l'ont amené à conclure que : *la constance approximative dans le rapport de la matière minérale à l'extrait total qui se ramène à la constance approximative dans le rapport de la matière organique dan le milieu intérieur de la feuille, paraît être un caractère fondamental.* (24).

On comprend que ce rapport ne peut pas être d'une constance rigoureuse, puisque nous savons que dans les variations que l'on constate, les substitutions ont lieu non poids pour poids, mais équivalent pour équivalent.

Un peu plus tard COLIN et GRANDSIRE, en étudiant la minéralisation des feuilles vertes et des feuilles chlorotiques, mais en faisant leurs déterminations sur la feuille globale (tissus et suc) ont lié le mécanisme régulateur à la fonction chlorophyllienne. « *Si l'on examine comparativement dans les deux espèces de feuilles les sels minéraux et les matières organiques, au cours du développement, en établissant le rapport pondéral des cendres à la matière organique on constate qu'il augmente sans déséparer dans les feuilles blanches et varie à peine dans les feuilles vertes.* » (25).

En tenant compte de ces diverses acquisitions successives, nous sommes amenés à étendre au global des substances organiques et minérales dissoutes dans le milieu intérieur, la constance que nous allons montrer sur la matière minérale, et nous pouvons songer à conclure à la régulation dans la pression osmotique.

Dans nos essais sur le blé, nous avons pu constater, par la détermination du Δ cryoscopique, que celui-ci présentait de faibles variations et que la plante tendait à réaliser un optimum osmotique

malgré les changements importants provoqués dans la composition du milieu intérieur, par l'action des engrais.

b) Les compensations minérales. —

Les résultats que nous allons donner ont été obtenus sur trois plantes de familles très différentes : une graminée, le blé, une crucifère, le navet et une légumineuse, le haricot.

Nous avons, comme toujours, employé la méthode du bouillon pour étudier la partie soluble. Les résultats sont exprimés en équivalents électrolytiques et rapportés à 1 litre d'eau de la plante.

1° *Blé*. — Récolte : fin mai. Plante entière.

	TÉMOIN	1000 KG SYLVINITE	1000 KG KCl	DIMINUTION DANS LE CARRÉ A SYLVINITE PAR RAPPORT AU TÉMOIN
Eau de la plante par kg de poids sec	3 ¹ 831	4 ¹ 347	4 ¹ 035	
Δ Cryoscopique	1°	1° 04	1° 13	
Alcalinité réduite	0,1187	0,0317	0,0363	69,4 %
Chlorures	0,0169	0,1150	0,1309	
Sulfates	0,0124	Traces	Traces	
Silicates	0,0529	0,0414	0,0386	27 %
Phosphates	0,0477	0,0419	0,0451	12 %
TOTAUX	0,2486	0,2300	0,2509	

Dans le tableau I, en dehors de la diminution de l'alcalinité réduite, l'action la plus remarquable de l'ion Cl est celle qui amène dans le milieu intérieur de la plante la presque totale disparition des sulfates dont nous verrons les conséquences.

2° *Navets*. — Récolte : 14 Juillet. Feuilles.

	SO ⁴ K ²	SO ⁴ Ca	KCl	DIMINUTION DANS LE CARRÉ A KCl PAR RAPPORT AU CARRÉ A SO ⁴ K ²	DIMINUTION DANS LE CARRÉ A KCl PAR RAPPORT AU CARRÉ A SO ⁴ Ca
Alcalinité réduite ..	0,03608	0,3670	0,2177	39,6 %	40,6 %
Sulfates	0,1520	0,1370	0,0890	41,4 %	35,7 %
Chlorures	0,0176	0,0080	0,2210		
Phosphates	0,0449	0,0629	0,0380	15,4 %	38,7 %
Silicates	0,0211	0,0166	0,0187	21,3 %	11,2 %
	0,5964	0,5915	0,5844		

Dans le tableau II, avec SO⁴K² et SO⁴Ca, même alcalinité réduite. Ce qui peut tenir à ce que les anions sont les mêmes, les cations ne semblant pas intervenir; avec KCl l'anion Cl amène au contraire une diminution marquée de 40 % environ.

Pour les sulfates, nous constatons une diminution du même ordre de grandeur, sans que celle-ci atteigne des proportions comparables à ce que nous avons trouvé sur le blé.

On trouve dans le milieu intérieur des plantes ayant reçu du sulfate de chaux plus de phosphates que dans le milieu intérieur des plantes ayant reçu du sulfate de potassium ou du chlorure de potassium.

Pour les silicates, la comparaison entre les parcelles à SO⁴K² et SO⁴Ca montre une diminution importante, dans la teneur en silicates, du milieu intérieur vraisemblablement par l'action précipitante de l'ion Ca. La comparaison des parcelles à SO⁴K² et KCl accuse une diminution des silicates de

21,3 % provoquée par la substitution de l'ion Cl à l'ion SO^4 mais diminution moins importante que celle due au cation Ca mentionné ci-dessus.

3° Haricots. — Récolte 14 juillet. Feuilles

	SO^4K^2	SO^4Ca	KCl	DIMINUTION DANS LE CARRÉ A KCl PAR RAPPORT AU CARRÉ A SO^4K^2	DIMINUTION DANS LE CARRÉ A KCl PAR RAPPORT AU CARRÉ SO^4Ca
Alcalinité réduite	0,3000	0,3108	0,1030	65,6 %	66,8 %
Sulfates	0,0254	0,0274	0,0101	60,2 %	63,1 %
Chlorures	0,0516	0,0101	0,2640		
Phosphates	0,0326	0,0551	0,0311	4,6 %	43,5 %
Silicates	0,0328	0,0188	0,0324	1,2 %	41,9 %
	0,4424	0,4222	0,4406		(augmentation)

Pour les haricots, l'alcalinité réduite n'a pas été influencée par le cation (parcelles à SO^4K^2 et SO^4Ca) par contre l'anion Cl amène pour celle-ci une diminution d'environ 65 % vis-à-vis des deux parcelles à SO^4K^2 et SO^4Ca .

La teneur en sulfates a été peu influencée par les cations tandis qu'ici l'anion Cl, comme dans les cas précédents, amène une diminution de 60 %.

Au sujet des phosphates mêmes conclusions que pour le navet.

Pour les silicates, diminution très importante que nous avons déjà constatée pour le navet dans la parcelle à SO^4Ca et pour laquelle nous pourrions invoquer les mêmes causes. Mais ici l'anion Cl ne provoque aucun changement (parcelles à SO^4K^2 et KCl).

CONCLUSIONS GENERALES

1°) Dans l'étude de l'action de l'ion Cl sur la composition du milieu intérieur des plantes, nous avons constaté que celui-ci tend à jouer dans ce milieu intérieur *un rôle osmotique* dont l'influence sur la végétation a pu être difficilement séparée de l'action du cation K auquel il est habituellement associé. Sa monovalence joue certainement un rôle dans l'action qu'il exerce et que nous avons constatée dans un certain nombre de plantes agricoles.

Dans le cas de la betterave, plante d'origine maritime, les teneurs en ions Cl atteignent des taux très élevés relativement aux autres plantes expérimentées.

2°) L'étude de l'action comparative des deux principaux engrais potassiques employés en agriculture *chlorures* et *sulfate* employés en quantités équivalentes au point de vue de leur teneur en potassium nous a montré d'une façon très nette qu'il existe dans le milieu intérieur une proportion beaucoup plus importante d'ion Cl monovalent que d'ion SO_4 divalent.

3° Dans le cas d'applications massives d'engrais chlorurés, nous avons vu tomber, dans le milieu intérieur de la feuille de blé et d'avoine, l'ion SO_4 à l'état de traces. Ce qui nous porte à conseiller, dans les applications importantes de chlorures, de veiller à ce que le sol soit suffisamment pourvu de sulfates.

L'ion Cl, en raison de sa monovalence, semble primer l'ion SO_4 au point de vue de sa présence dans le milieu intérieur et nous avons mentionné un inconvénient possible. Il exerce visiblement une

action semblable vis-à-vis de l'alcalinité réduite, c'est-à-dire des acides organiques salifiés dans le milieu intérieur.

Ce fait nous semble présenter un grand intérêt au point de vue de l'économie intérieure de la plante. Les acides organiques étant élaborés aux dépens des hydrates de carbones (sucres) pour les besoins de la plante, il en résulterait une économie de ces hydrates de carbone qui viendraient augmenter les réserves.

4°) L'étude d'ensemble des principaux sels composant la *minéralisation* du milieu intérieur d'une même plante, cultivée avec des formules différentes d'engrais pour faire varier la proportion des composants élémentaires de cette minéralisation, nous a permis de montrer que par des substitutions équivalentes la plante tendait à réaliser un optimum osmotique caractéristique, variable avec la plante mais fixe pour chacune d'elles. Avec les réserves que nous avons mentionnées, relatives à la phase du développement, à la température et autres influences atmosphériques qui ont une répercussion sur la concentration et la pression osmotique du milieu intérieur.

Cette régulation physico-chimique constatée chez les végétaux permet ainsi un rapprochement avec ce qui se passe chez les animaux où ces phénomènes sont apparus depuis longtemps avec beaucoup plus de précision et de netteté, la vie animale présentant, en général, beaucoup moins d'aléas et de perturbations que la vie végétale.

QUATRIÈME PARTIE

INFLUENCE DES CHLORURES SUR LES RENDEMENTS DE DIVERSES PLANTES CULTIVÉES

I. — CONSIDERATIONS GÉNÉRALES

Les sels de potassium ne sont employés en agriculture que depuis peu de temps. La plupart des agronomes affirmaient que les sols renfermant d'une manière générale assez de potasse pour faire face aux besoins des plantes cultivées il n'était pas nécessaire d'apporter à la terre des engrais potassiques. On admet, généralement, aujourd'hui, que la potasse influe sur le rendement des récoltes et notamment sur celles qui ont essentiellement pour objet la production des hydrates de carbone.

Actuellement la nécessité des engrais potassiques est admise par l'unanimité des agronomes.

Les sels de potasse présentés aux agriculteurs sont des chlorures plus ou moins mélangés et du sulfate de potassium.

Les chlorures existent dans le commerce à l'état de sels bruts ou de sels raffinés. Les sels bruts sont le carnallite, le kainite et le hartsalz que l'on extrait des mines de Stassfurt et les sylvinites que l'on extrait des mines de potasse d'Alsace.

Les engrais potassiques allemands renferment d'importantes proportions de sels de magnésium à

l'état de chlorure et de sulfate et du chlorure de sodium. Les engrais potassiques d'Alsace contiennent beaucoup moins de sels de magnésium et plus de chlorure de potassium.

Ces divers sels sont fréquemment employés à l'état brut. Mais très souvent aussi, surtout quand il s'agit de les transporter à de grandes distances, on les raffine afin de diminuer le coût du transport de l'unité de potasse que l'on continue de considérer comme seule active dans les engrais potassiques.

Par simple concentration basée sur la différence de solubilité du chlorure de potassium et des autres sels qui l'accompagnent on obtient du chlorure de potassium.

Mais les chlorures ont été considérés pendant longtemps comme nuisibles aux plantes et l'on a voulu alors les éliminer par double décomposition afin d'obtenir du sulfate de potassium.

En France les engrais potassiques sont aujourd'hui vendus sous les formes suivantes :

1° Sylvinite ordinaire renfermant 21 à 25 % de chlorure de potassium et 55 à 67 % de chlorure de sodium etc.

2° Sylvinite riche renfermant 32 à 35 % de chlorure de potassium, 50 à 55 % chlorure de sodium, etc.

3° Chlorure de potassium renfermant de 80 à 98 % de chlorure de potassium pur.

4° Sulfate de potassium à 90 % de pureté.

Le raffinage des sels de potassium et notamment la transformation en sulfate, sont des opérations qui coûtent cher et qui élèvent considérablement les prix des divers engrais potassiques et, par conséquent, le prix de l'unité de potasse.

Ces prix sont en ce moment les suivants aux mines d'Alsace*.

* Mars 1932.

1° Sylvinite ordinaire, 12 % de potasse : 10 fr. 60 soit 0 fr. 88 le kg de potasse ;

2° Sylvinite riche, 18 % de potasse : 16 fr. 80 soit 0 fr. 93, le kg de potasse ;

3° Chlorure de potassium, 46 % de potasse : 68 fr. 70, soit 1 fr. 49 le kg de potasse ;

4° Sulfate de potassium, 49 % de potasse : 94 frs soit 1 fr. 91 le kg de potasse.

Il était donc intéressant, ne serait-ce qu'au point de vue économique, d'étudier de plus près l'action des chlorures sur la végétation et de déterminer si réellement ils sont toxiques pour les plantes.

Au lendemain de l'Armistice une propagande très intense, sans précision, qui fut souvent mal interprétée par beaucoup d'agriculteurs, semblait confirmer l'opinion que l'on avait sur la nocivité des chlorures.

De nombreux essais méthodiques furent alors chaque année organisés un peu partout en France et l'on voit, depuis, augmenter, très rapidement et dans de très fortes proportions, l'emploi des sels de potasse comme engrais chimiques.

Nous avons nous-même poursuivi des essais variés sur diverses cultures. C'est le contrôle au laboratoire de ces essais qui nous a amené à préparer notre étude sur les équilibres physico-chimiques et les compensations minérales chez quelques plantes cultivées.

Mais cette étude doit être complétée par des expériences faisant connaître les effets morphologiques des engrais potassiques sur les plantes cultivées.

Il est important de vérifier si les diverses conclusions que nous avons tirées des essais contrôlés peuvent se traduire par des résultats pratiques intéressants.

C'est ce que nous allons faire en donnant les résultats que nous avons obtenus dans des essais divers

faits dans le département de Seine-et-Oise. Nous serons naturellement obligés de limiter le nombre de nos exemples mais nous les ferons suivre de résultats obtenus dans d'autres régions afin de bien montrer qu'il ne s'agit pas de cas particuliers au département qui nous intéresse.

Tous les essais dont nous allons donner les résultats portent sur des parcelles généralement étendues. Les terrains sur lesquels ils ont lieu sont aussi homogènes que possible. Les fumures de base sont naturellement uniformes. Ce sont celles qui sont régulièrement employées dans les exploitations où ont lieu les essais.

Les engrais chimiques sont répandus au moyen de distributeurs d'engrais, c'est-à-dire, avec une régularité suffisante.

Les résultats sont généralement évalués en prenant dans chaque parcelle des superficies déterminées dans lesquelles la végétation est aussi homogène que possible.

On peut reprocher aux expériences agricoles de n'avoir pas la même précision que les expériences de laboratoire et de donner des résultats dont les causes ne peuvent pas être mises en évidence avec une netteté suffisante.

Il semble, cependant, que la répétition d'un même fait dans des situations diverses et portant sur des plantes de familles différentes autorise à tirer des conclusions pratiques d'autant plus rationnelles qu'elles se concilient davantage avec les conclusions tirées d'expériences de laboratoire.

II. — L'ADDITION DE CHLORURE DE POTASSIUM
AUX FUMURES
AUGMENTE LES RENDEMENTS DES RECOLTES
CES RENDEMENTS S'ACCROISSENT EN MEME TEMPS
QUE LES QUANTITES DE CHLORURE EMPLOYEES

N. B. — Tous les rendements sont donnés en kilogrammes à l'hectare.

1° Sur blé d'hiver

			RENDEMENTS	
			PAILLE	GRAIN
1 ^{er} Essai	Témoin		2.700 Kgs	1.780 Kgs
	500 kgs KCl		3.100 —	1.950 —
	Différences		400 —	170 —
2 ^e Essai	Témoin		2.970 Kgs	1.725 Kgs
	500 kgs KCl		3.150 —	1.850 —
	Différences		180 —	125 —
3 ^e Essai	Témoin		3.150 Kgs	1.850 Kgs
	500 kgs KCl		3.200 —	1.990 —
	Différences		50 —	140 —

2° Avec doses croissantes de chlorures

PARCELLES	APPLICATION D'HIVER	EXCÉDENT PAR RAPPORT AU TÉMOIN	APPLICATION DE PRINTEMPS	EXCÉDENT PAR RAPPORT AU TÉMOIN
I. — Témoin	2.000 Kgs	—	2.000 Kgs	—
II. — 200 Kgs	2.900 —	900 —	2.800 —	800 —
III. — 400 Kgs	3.100 —	1.100 —	2.950 —	950 —
IV. — 800 Kgs	3.250 —	1.250 —	3.000 —	1.000 —

3° Sur Betteraves à Sucre
(200 kgs chlorure de potassium à l'hectare)

	1 ^{er} ESSAI	2 ^e ESSAI	3 ^e ESSAI	4 ^e ESSAI	5 ^e ESSAI
Avec chlorure	29.300 k.	34.200 k.	36.600 k.	29.000 k.	36.500 k.
Témoin	28.000 k.	31.500 k.	35.000 k.	25.000 k.	34.000 k.
Différence en faveur du KCl .	1.300 k.	2.700 k.	1.600 k.	4.000 k.	2.500 k.

4° Sur Pommes de terre (200 kgs KCl à l'hectare)

	1 ^{er} ESSAI	2 ^e ESSAI	3 ^e ESSAI	4 ^e ESSAI	5 ^e ESSAI
Avec chlorure	16.100 k.	22.300 k.	14.000 k.	17.700 k.	26.100 k.
Témoin	15.200 k.	21.500 k.	13.500 k.	17.700 k.	25.000 k.
Différence en faveur du KCl .	900 k.	800 k.	500 k.	700 k.	1.100 k.

5° Avec doses croissantes de chlorures

PARCELLES	1 ^{er} ESSAI	EXCÉDENT PAR RAPPORT AU TÉMOIN	2 ^e ESSAI	EXCÉDENT PAR RAPPORT AU TÉMOIN	3 ^e ESSAI	EXCÉDENT PAR RAPPORT AU TÉMOIN
	Kilos	Kilos	Kilos	Kilos	Kilos	Kilos
I. — Témoin	9.130	—	12.250	—	11.000	—
II. — 200 kgs KCl	10.560	1.430	12.630	380	12.500	1.500
III. — 400 kgs KCl	10.820	1.690	12.590	340	13.200	2.200
IV. — 600 kgs KCl	10.970	1.840	12.880	630	13.200	2.200
V. — 800 kgs KCl	10.975	1.845	12.900	650	13.500	2.500

6° Sur Luzerne (200 kgs chlorure de potassium)

	1 ^{er} ESSAI	2 ^e ESSAI
Avec chlorure	4.500 Kgs	5.700 Kgs
Témoin	3.500 —	4.500 —
Différence en faveur du chlorure	1.000 —	1.200 —

7° Avec doses croissantes de chlorures

		EXCÉDENT PAR RAPPORT AU TÉMOIN
Témoin	4.500 Kgs	—
200 Kgs KCl	4.650 —	150 Kgs
400 — —	5.080 —	580 —
600 — —	5.660 —	1.160 —
800 — —	5.890 —	1.390 —

8° Sur haricots (en grains secs)

		EXCÉDENT PAR RAPPORT A LA 1 ^{re} PARCELLE
150 Kgs chlorure	1.440 Kgs	—
400 — —	1.510 —	70 Kgs
600 — —	1.740 —	300 —

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans la première partie de notre étude nous avons montré que les doses de Cl, dans le milieu intérieur des plantes, augmentait avec les doses de chlorures qu'on met à leur disposition et, d'autre part, nous avons montré que l'addition de chlorures augmentait la pression osmotique.

Or, la croissance des plantes dépend de la pression osmotique.

Le parallélisme que nous venons de constater entre l'augmentation des quantités de chlorures mises à la disposition des plantes et les rendements de ces plantes nous semble être une vérification pratique suffisante de ce que nous avons constaté au laboratoire.

III. — IL EXISTE POUR LES DIVERSES CULTURES
DES DOSES DE CHLORURES AU-DELA DESQUELLES
LES RENDEMENTS CESSENT D'AUGMENTER

9° *Sur blé*

	RENDEMENTS	
	EN PAILLE	EN GRAINS
	Kgs	Kgs
I. — 300 Kgs superphosphate		
300 — nitrate de soude		
300 — sylvinite	4.400	2.600
II. — Même fumure + 500 Kgs KCl	2.350	2.360
Diminution due à l'addition de chlo- rure	2.050	240

10° *Sur avoine* (avec sylvinite riche)

		EXCÉDENT PAR RAPPORT AU TÉMOIN
300 Kg	3.250 Kg	—
600 —	4.560 —	1.310 Kg
900 —	4.370 —	1.120 —

11° *Sur betterave à sucre*

1 ^{er} essai	Témoin	20.000 Kg
	250 Kg KCl	21.500 —
	250 Kg KCl+Kg 500 Sylvinite	21.000 —
	Diminution due à l'addition de sylvinite	500 Kg

12° Avec doses croissantes de chlorure de potassium

		AUGMENTATION DES RENDEMENTS PAR RAPPORT AU TÉMOIN	
2° essai	Témoin	18.400 Kg	—
	400 kg	19.100 —	700 Kg
	600 kg	20.560 —	2.110 —
	800 kg	20.310 —	1.990 —

13° Sur pommes de terre (avec chlorure de potassium)

PARCELLES		AUGMENTATIONS
I — Témoin	11.200	—
II — 200 kg KCl	12.400	1.200 Kg
III — 600 —	13.600	2.400 —
IV — 800 —	13.400	2.200 —
V — 1000 —	12.160	860 —

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus dans trois des essais ci-dessus (avoine, pommes de terre, betteraves à sucre) montrent que la dose de 600 kgs de sylvinite ou de chlorure à l'hectare semble être la dose optima. Au delà les rendements diminuent. Il y a lieu de remarquer que ces essais ont été faits en des régions et sur des sols très divers puisque l'essai sur avoine a eu lieu dans la Haute-Marne et les deux autres en des points différents de Seine-et-Oise.

On ne saurait cependant affirmer que ce chiffre ait une valeur absolue. C'est autour de lui que semble osciller la dose optima qui doit varier évidemment avec la nature du sol et l'espèce cultivée.

A quoi faudrait-il attribuer cette action des chlorures potassiques? La question de toxicité ne se pose pas puisque si les plantes donnent des rendements

moins élevés elles continuent, cependant, à donner des rendements élevés avec des quantités de chlorures potassiques supérieures à celles que nous pourrions considérer comme étant des doses optima.

Les physiologistes semblent admettre que les chlorures jouent un rôle important dans la formation et la migration des hydrates de carbone mais que leur excès contrarierait cette formation.

Nous avons vu, d'autre part, dans la deuxième partie de notre étude, que l'ion Cl monovalent se trouve en plus grande quantité que l'ion SO_4 divalent dans le milieu intérieur des plantes et tend même à l'éliminer. Nous avons signalé les inconvénients de ce phénomène : il peut y avoir arrêt de la formation des matières albuminoïdes dont le soufre est un des éléments essentiels et par conséquent arrêt du développement de la plante.

Il nous paraît intéressant de rappeler, d'autre part, que dans des essais de doses progressives de chlorure de potassium sur la betterave demi-sucrière nous avons trouvé, ainsi que nous l'avons dit dans la première partie de cette étude, qu'il existait une dose d'engrais potassiques chlorurés au-dessus de laquelle la teneur en chlore des feuilles et des racines diminue. Dans l'expérience citée la dose maxima était celle de 1,000 kg de KCl à l'Ha.

IV. — LES AUGMENTATIONS DE RENDEMENTS OBTENUS PAR L'ADDITION DE CHLORURE DE POTASSIUM PARAISSENT DUES A LA FOIS A L'ACTION DU POTASSIUM ET A CELLE DU CHLORE.

14° *Essais comparés de sylvinite et de chlorure de potassium*

I. — 200 kgs de chlorure de potassium correspondant à environ 100 kgs de potasse.

II. — 400 kgs de sylvinite riche correspondant à 90 kgs de potasse.

III. — Témoin (pas d'engrais potassique).

	1 ^{er} ESSAI	2 ^e ESSAI	3 ^e ESSAI	4 ^e ESSAI	5 ^e ESSAI	6 ^e ESSAI	7 ^e ESSAI
I. —	3075	2150	3460	2825	2140	2840	2630
II. —	3260	2250	3440	2720	2250	2825	2740
III. —	2450	1940	3130	2610	1930	2515	2420
Excédent dû au chlorure (20 %)	615 (9,7 %)	210 (9,7 %)	330 (9,5 %)	215 (7,5 %)	210 (9,8 %)	325 (11,4 %)	210 (7,5 %)
Excédent dû à la sylvinite (25,1 %)	810 (25,1 %)	310 (13,7 %)	310 (9 %)	110 (4 %)	320 (14,2 %)	310 (10,9 %)	320 (11,6 %)

Dans les parcelles à sylvinite qui ont reçu moins de potassium mais plus de chlore les rendements obtenus ont été comparés à ceux que l'on a obtenus avec le chlorure de potassium.

4 fois supérieurs { 1^{er} essai : 5,1 % en plus
2^e essai : 4 % en plus
5^e essai : 4,4 % en plus
7^e essai : 4,1 % en plus

2 fois à peu près égaux { 3^e essai : 0,50 % en moins
6^e essai : 0,5 % en moins

1 fois inférieur 4^e essai : 3,5 % en moins

15° Essais comparés du chlorure de potassium
et du sulfate de potassium

NUMÉRO DE LA PARCELLE	ESSAI SUR AVOINE		PAILLE + GRAIN A L'HA	GRAIN A L'HA
1	Témoin		—	—
2	Nitrate 200 k. + super 400 k.		100,00	31,00
3	Nitrate 200 k. + super 400 k. + Chl. Pot. 200 k.		107,50	32,50
4	Nitrate 200 k. + super 400 k. + Sulf. potasse 200 k.		93,33	24,10
5	Témoin		93,33	28
6	Nitrate 200 k. + super 400 k. + Chl. Pot. 400 k.		116,66	33,30
7	Nitrate 200 k. + super 400 k. + Sulf. Pot. 400 k.		118,33	36,60
8	Nitrate 200 k. + super 400 k. + Chl. Pot. 600 k.		113,33	35,00
9	Nitrate 200 k. + super 400 k. + Sulf. Pot. 600 k.		105	28,83
10	Témoin		100	34,66
11	Témoin		108,33	32,55
12	Nitrate 400 k. + super 800 k.		105	32,50
13	Nitrate 400 k. + super 800 k. + Chl. Pot. 600 k.		116,66	36,33
14	Nitrate 400 k. + super 800 k. + Sulf. Pot. 600 k.		113,33	31,33
15	Témoin		83,33	25,83
16	Nitrate 600 k. + super 1200 k.		120,00	38,66
17	Nitrate 600 k. + super 1200 k. + Chl. Pot. 600 k.		—	32,50
18	Nitrate 600 k. + super 1200 k. + Sulf. Pot. 600 k.		138,32	28,66
19	Témoin		85	24
20	Témoin		95	27,16

Ces résultats corroborent d'ailleurs ceux qu'obtint SCHREIBER, pendant six années consécutives sur la betterave à sucre.

En terre sablonneuse (72)

ENGRAIS	RENDEMENTS EN RACINES A L'HA	% DE SUCRE	RENDEMENTS EN SUCRE A L'HA
Complet sans potasse	50.424 k.	13,66	6.898 k.
Avec chlorure de potassium	58.257 k.	14,08	8.204 k.
Avec sulfate de potassium	56.000 k.	14,10	7.900 k.

En terre limoneuse

Complet sans potasse	36.171	14,01	5.066 k.
Avec chlorure de potassium	47.991	15,01	7.206 k.
Avec sulfate de potassium	44.555	14,24	6.446 k.

En terre silico-argileuse M. JORET, directeur de la Station agronomique d'Amiens, arrive à des constatations analogues en employant 700 kgs de sylvinite en comparaison avec le chlorure et le sulfate de potassium pour des doses égales de potasse.

Les résultats rapportés à 100 pour le sulfate ont été les suivants :

		DENSITÉ
Sulfate de potassium	100	8° 4
Chlorure de potassium	100,03	8° 6
Sylvinité	106,07	8° 7

Il est intéressant de signaler, dans ces essais, l'action des chlorures sur la densité saccharimétrique des betteraves (²³).

Ces résultats sont identiques à ceux qui ont été obtenus en Hesbaye limbourgeoise (Belgique) où, pour des doses égales de potasse (K²O), on a obtenu, à la fois, plus de betteraves à l'hectare et une richesse saccharine supérieure.

L'action spéciale du chlore sur les rendements semble également ressortir des expériences suivantes poursuivies pendant 4 ans (1924, 1925, 1926 et 1927) par M. ZACCHAREWICZ sur la vigne à Montagnac (²³).

L'essai portait sur 1.000 souches (rendement en raisin rapporté à l'Ha) :

		1924	1925	1926	1927
I	{ 50 Kg sulfate d'ammoniaque ...	11.050	9.350	9.280	6.770
	{ 50 — sulfate de potassium				
	{ 100 — superphosphate				
II	{ 40 Kg chlorure d'ammonium ..	12.645	11.220	8.320	7.459
	{ 50 — sulfate de potassium				
	{ 100 — superphosphate				
	Différence en faveur du chlorure	1.595	1.870	960	689

A Rothamsted les deux mêmes engrais (sulfate d'ammoniaque et chlorhydrate d'ammoniaque) essayés comparativement pendant quatre ans ont donné sur céréales les résultats suivants :

100 représentant les rendements obtenus avec le sulfate d'ammoniaque ceux que l'on a obtenus avec le chlorhydrate d'ammoniaque ont été les suivants :

1921	106
1922	103
1923	109
1924	104 ⁽²²⁾

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans les résultats obtenus par l'emploi de chlorures potassiques il est difficile de faire le départ entre l'action de l'anion Cl et celle du cation K.

Mais les expériences que nous venons de citer permettent de supposer que l'action du Cl a eu une influence propre sur l'augmentation des rendements. Nous avons vu, en effet, que :

1° Avec des doses de potassium moindres mais avec plus de chlore le blé, avec la sylvinite, a donné des rendements supérieurs à ceux obtenus avec du chlorure de potassium.

2° Avec des doses de potassium égales le chlorure de potassium a donné des rendements supérieurs à ceux du sulfate de potassium.

3° Avec les mêmes quantités de sulfate de potassium mais pour des doses égales d'azote le chlorhydrate d'ammoniaque a donné des rendements supérieurs à ceux du sulfate d'ammoniaque.

L'action du Cl sur la formation des hydrates de carbone en général et sur les sucres, en particulier, semble bien ressortir de ces essais car sur la bette-

rave à sucre cette action s'est traduite non seulement par l'augmentation du poids des racines mais encore par un accroissement du degré saccharimétrique et partant du rendement en sucre de l'hectare de betterave.

Les résultats obtenus par M. ZACCHAREWICZ sur la vigne semblent être du même ordre.

Nous avons vu dans la troisième partie de notre étude que, dans le milieu intérieur de la plante, l'anion Cl se substitue à d'autres anions et notamment à l'anion SO_4 et aux autres anions d'acides organiques.

Ces derniers, on le sait, sont élaborés au détriment des hydrates de carbone de sorte que la substitution de l'anion Cl aux anions d'acides organiques peut permettre d'augmenter les réserves des plantes.

Il semble possible de conclure des expériences dont nous venons de donner les résultats que les augmentations de rendements obtenus par l'addition de chlorure de potassium sont dues :

- 1° Au pouvoir osmotique du chlore;
- 2° A son rôle probable dans l'élaboration des hydrates de carbone;
- 3° A l'augmentation des réserves due au fait que l'anion Cl se substitue dans le milieu intérieur aux anions des acides organiques.

Il y a lieu, à notre avis, de préciser davantage ces conclusions en effectuant de nouvelles recherches au laboratoire. Il y a, dans ce domaine, des travaux d'un très grand intérêt scientifique et technique à poursuivre.

V. — ACTION SIMULTANÉE DE LA CHAUX ET DU CHLORURE DE POTASSIUM SUR LES RENDEMENTS DES CULTURES.

Il peut arriver qu'on obtienne, dans certains essais, des résultats différents de ceux que de nombreuses expériences permettaient d'en attendre.

Le cas fortuit ou prétendu tel se produit assez souvent dans la pratique agricole car les conditions dans lesquelles on opère sont parfois assez dissimilaires malgré certaines apparences. Les causes des résultats discordants que l'on peut obtenir dans une même exploitation tiennent :

aux différences de milieu dues au manque d'homogénéité du sol;

aux différences de conditions climatiques d'une année à l'autre ;

aux différences individuelles parfois marquées entre les semences ou plants cultivés.

Nous allons citer, à titre d'exemples, deux expériences faites dans des terrains en apparence semblables et relativement voisins.

16° *Dans la première expérience deux essais simultanés ont lieu sur blé en terrain argilo-siliceux à sous-sol peu perméable.*

PARCELLES	1 ^{er} ESSAI	2 ^e ESSAI
I — Témoin	2.450	2.840
II — 200 kg chlorure de potassium	2.550	2.750
III — 1.000 kg de chaux	3.050	3.200
IV — 1.000 kg de chaux + 200 kg KCl	2.150	2.250

17° Dans la deuxième expérience un essai analogue a lieu sur avoine en terrain argilo-calcaire perméable.

PARCELLES	RENDEMENTS
I — Témoins	2.125 kg
II — 900 kg chlorure de potassium	3.150 —
III — 1.000 kg de chaux	3.500 —
IV — 1.000 kg de chaux + 900 kg KCl...	3.600 —

Dans des cultures en pots sur maïs SCHREIBER a obtenu des résultats semblables.

Sol sablonneux

PARCELLES	RÉCOLTES MOYENNES EN MATIÈRES SÈCHES
I — Témoin	75 gr. 45
II — 4 gr. KCl	113 gr. 00
III — 4 gr. KCl + 2 gr. CO ² Ca	134 gr. 60
V — — + 4 gr. —	166 gr. 00
IV — — + 8 gr. —	178 gr. 00

« Il y a donc, dans ce cas, augmentation des rendements avec les doses croissantes de carbonate de chaux ».

Alluvion sablo-limoneuse

PARCELLES	RÉCOLTES MOYENNES EN MATIÈRES SÈCHES
I — Témoin	24 gr. 70
II — 4 gr. KCl	122 gr. 40
III — 4 gr. KCl + 2 gr. CO ² Ca	124 gr. 20
V — — + 4 gr. —	144 gr. 80
IV — — + 8 gr. —	137 gr. 50
VI. — — + 16 gr. —	129 gr. 60

« Ici, aux doses faibles, le carbonate de chaux se montre utile. Aux doses plus fortes, il y a, dans les

excédents de rendement, ce qui est dû à l'insolubilisation partielle de l'acide phosphorique actif » ⁽¹³⁾.

L'influence de l'application de chlorure de potassium et de chaux est marquée davantage à l'époque de la germination.

Il arrive fréquemment qu'en terrain calcaire ou après une application d'amendements ou d'engrais calcaires, le chlorure de potassium et la sylvinite répandus, peu avant les semis ou plantations, causent des accidents graves, même en terrain perméable.

Au Parc Saint-Maur nous avons fait l'expérience suivante :

18° *Distribution des engrais et semis d'avoine le 18 Avril. Le soir même il pleuvait.*

	NOTES DONNÉES LES					
	23 MAI		7 JUIN		4 JUILLET	
	LEVÉE	VIGUEUR	HAUTEUR DES TIGES	ÉPAISSEUR DES TIGES	HAUTEUR DES TIGES	SORTIE DES GRAPPES
Témoin	10	8	9	9	5	3
200 kg KCl	10	10	10	10	10	6
300 kg SO ⁴ K ²	10	9	8	8	7	6
800 kg sylvinite + 300 kg CaO..	3	4	8	9	4	1
— sylvinite + 600 kg CaO..	3	5	9	9	4	2
— sylvinite + 900 kg CaO..	4	4	9	10	4	1

Nota. — (Le mode de notation employé est celui que nous avons l'habitude d'utiliser dans les concours cultureux en prenant pour base les cultures qui ont la plus belle et la plus mauvaise apparence).

Dans ces expériences qui avaient lieu en terrain

perméable l'action du chlorure de calcium formé s'est fait sentir sur la levée.

Nous avons fait des constatations analogues dans des cultures en pots sur haricots.

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans nos expériences nous étions dans des conditions assez semblables à celles des expériences de Schreiber.

Dans notre première expérience, en terrain argilo-siliceux peu perméable semblable à l'alluvion sablo-limoneuse, nous avons mis en présence une forte dose, de calcaire et un cinquième de son poids de chlorure, c'est-à-dire, un excédent de chaux par rapport au chlorure.

Dans la troisième expérience faite en terrain perméable comme le sol sablonneux de la première expérience de Schreiber, nous avons en présence 1.000 kgs de calcaire et 900 kgs de chlorure, c'est-à-dire, des quantités à peu près égales de chaux et de chlorure.

L'analyse que nous avons faite des échantillons d'avoine prélevés en juin nous montre que les quantités d'acide phosphorique sont importantes, aussi bien dans la partie soluble que dans la partie insoluble de la plante.

PHOSPHATE	I	II	III	IV
	Témoin	900 kg KCl	1000 kg CO ² Ca	1000 kg KCl + 900 kg KCl
Partie soluble	0,253	0,269	0,217	0,252
Partie insoluble	0,220	0,295	—	0,191
TOTAUX	0,473	0,564	—	0,443

L'action insolubilisatrice de la chaux se trouve ici vérifiée. Tandis que dans les trois autres parcelles la teneur de la partie soluble en acide phosphorique est à peu de chose près identique, elle est sensiblement inférieure dans la parcelle qui n'a reçu que du carbonate de chaux. Nous n'avons pu, par suite d'un accident de laboratoire, avoir la teneur en acide phosphorique de la partie insoluble dans cette parcelle. Nous constatons cependant que dans la dernière parcelle l'action du carbonate se traduit par une diminution de l'acide phosphorique dans la partie insoluble.

Cependant les rendements des parcelles III et IV sont supérieurs à ceux des autres parcelles.

Il est vraisemblable d'admettre que dans la parcelle III, la nitrification des matières azotées du sol a donné à la plante un élément à la fois osmotique et plastique, l'azote nitrique, et que dans la parcelle IV l'action osmotique du Cl a également permis une plus grande élaboration de matières de réserve.

Mais, dans la première expérience, les deux essais sont concordants : le mélange de chaux et de chlorure de potassium provoque une diminution très marquée des rendements sur les autres parcelles et notamment sur la parcelle qui n'a reçu que de la chaux

La raison que l'on peut donner de cette constatation, dans nos expériences, c'est que l'action de la chaux seule est due à son influence sur la nitrification tandis, qu'un mélange avec le chlorure de potassium, il s'est formé du chlorure de calcium qui, en terrain peu perméable, a nui aux plantes.

En terrain perméable, aussi bien dans nos expériences que dans celles de Schreiber, cette action nocive ne s'est pas manifestée.

VI. — CONSIDERATIONS ECONOMIQUES

Nous avons déjà dit que la substitution de l'ion Cl aux ions d'acides organiques dans le milieu intérieur constituait une économie qui pouvait avoir une certaine importance. Les hydrates de carbone, en effet, n'étant pas transformés en acides organiques sont mis en réserve par les plantes.

L'ion Cl se substitue à des ions qui jouent à la fois un rôle osmotique et un rôle plastique. C'est le cas en particulier de l'ion SO_4 . Tant que la quantité de ce dernier est suffisante pour lui permettre de jouer son rôle plastique dans la formation des protéines la substitution de l'ion Cl à l'ion SO_4 constitue une économie car il a l'avantage d'être à la fois meilleur marché et plus actif que l'ion SO_4 au point de vue osmotique.

Dans la discussion des résultats obtenus sur une culture avec des doses différentes d'engrais, il faut distinguer entre le rendement en produits et les bénéfices réalisés. C'est une considération qui à une grande importance car l'agriculteur n'a, en définitive en vue, dans l'exercice de son industrie, que la réalisation d'un bénéfice qu'il désire aussi élevé que possible.

Il n'y a pas toujours concordance entre les rendements et les bénéfices et le plus souvent le *rendement économique optimum* précède le *rendement agronomique optimum*.

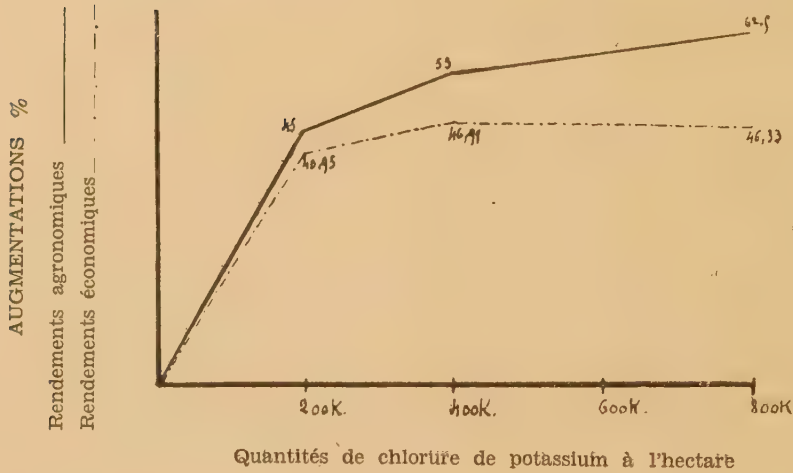
Nous allons citer quelques exemples pris parmi ceux que nous avons déjà donnés.

Nous appliquerons aux prix des engrais et des récoltes, les prix actuels (Mars 1932) :

Prix du chlorure à 46 % de K_2O : 68 fr. 70, les 100 kgs pris à la mine; Blé : 170 frs les 100 kgs; Pommes de terre : 90 frs, les 100 kgs.

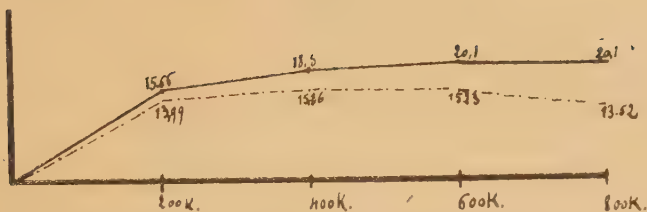
1°) *Sur blé* (Expérience N° 2, 1^{er} essai)

	DÉPENSES SUP- PLÉMENTAIRES POUR ACHAT DE KCl	BÉNÉFICES SUPPLÉ- MENTAIRES	AUGMENTATIONS %	
			DES RENDEMENTS	DES BÉNÉFICES
I				
II	137,40	1.392,60	45	40,95
III	274,80	1.595,20	55	46,91
IV	549,60	1.575,40	62,5	46,33



2°) *Sur pommes de terre* (Expérience N° 5, 1^{er} essai)

	DÉPENSES SUP- PLÉMENTAIRES POUR ACHAT DE KCl	BÉNÉFICES SUPPLÉ- MENTAIRES	AUGMENTATIONS %	
			DES RENDEMENTS	DES BÉNÉFICES
I				
II	137,40	1.149,60	15,66	13,99
III	274,80	1.246,20	18,5	15,16
IV	412,20	1.243,80	20,1	15,13
V	549,60	1.110,90	20,1	13,52

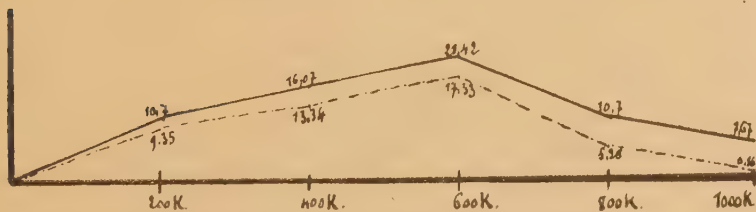


Quantités de chlorure de potassium à l'hectare

Cas où l'on dépasse la dose optima de chlorure.

3°) Sur pommes de terre (Expérience N° 13)

	DÉPENSES SUPPLÉMENTAIRES PAR HA	BÉNÉFICES SUPPLÉMENTAIRES	AUGMENTATIONS %	
			DES RENDEMENTS	DES BÉNÉFICES
I				
II	137,40	942,60	10,7	9,35
III	274,80	1.345,20	16,07	13,34
IV	412,20	1.747,80	21,42	17,33
V	549,60	530,40	10,7	5,26
VI	687,00	87	7,67	0,86



Quantités de chlorure de potassium à l'hectare

L'étude de ces courbes montre avec plus de netteté que les chiffres :

1°) Que les augmentations de bénéfices ne sont pas proportionnelles aux augmentations de rendements car dès l'origine les deux courbes sont divergentes.

2°) Que les augmentations de bénéfices s'arrêtent plus tôt que les augmentations de rendements,

CONCLUSIONS GENERALES AU POINT DE VUE TECHNIQUE

1°) Les engrais potassiques chlorurés exercent sur l'augmentation des rendements agricoles une influence incontestable.

2°) Il existe dans l'emploi de ces engrais des doses limites au delà desquelles les rendements diminuent. Il y a lieu de distinguer entre les rendements agronomiques et les rendements économiques ou bénéfiques nets ces derniers atteignant leur maximum avant les autres.

3°) L'action des engrais potassiques chlorurés semble due à la fois au rôle du potassium et à celui du chlore. L'emploi des chlorures semble confirmer, dans la pratique agricole, les constatations que nous avons faites dans les essais contrôlés au laboratoire, notamment celles qui sont relatives au rôle que l'ion Cl peut jouer au point de vue économique dans l'alimentation des plantes en se substituant à des ions qui coûtent plus cher.

4°) L'emploi simultané des engrais potassiques chlorurés et de la chaux peut provoquer une diminution des rendements. Il n'y a lieu d'avoir recours à cette pratique que dans des terrains perméables, l'inconvénient constaté pouvant, d'ailleurs, se présenter pour des terres riches en chaux reposant sur un sous-sol imperméable.

5°) L'emploi des engrais potassiques chlorurés est recommandable pour des raisons techniques et pour des raisons économiques l'unité de potasse qui sert de base à l'établissement des prix coutant meilleur

marché dans les engrais chlorurés bruts, que dans les chlorures raffinés et le sulfate de potassium.

6°) L'emploi exclusif des *engrais complexes synthétiques* purs en supprimant le chlore et, d'ailleurs aussi, d'autres anions que les engrais ordinaires fournissent aux plantes, pourrait provoquer, au bout de quelque temps, une chute sensible des rendements agronomiques et des rendements économiques et amener, en outre, des maladies de carence graves pour certaines cultures permanentes comme les cultures fruitières et celle de la vigne par exemple.

BIBLIOGRAPHIE

ANDRÉ G.

1. Sur la composition des suc végétaux extraits des racines. (*C. R. Ac. Sc. t. 143, p. 106*).
2. Sur la composition des suc végétaux extraits des tiges et des feuilles. (*C. R. Ac. Sc. t. 144, p. 276*).
3. Sur la migration des principes solubles dans le végétal (*C. R. Ac. Sc. t. 144, p. 383*).
4. Sur la constance de la composition des suc végétaux obtenus par des extractions successives. (*C. R. Ac. Sc. t. 145, p. 1349*).
5. De la conservation des matières salines pendant le cours de la végétation d'une plante annuelle. (*C. R. Ac. Sc. t. 151, p. 1378*).
6. Sur les substances solubles que l'on rencontre dans les tubercules de pommes de terre et déplacement par l'eau. (*C. R. Ac. Sc. t. 153, p. 1234*).
7. Dosage du soufre et du phosphore totaux. (*C. R. Ac. Sc. t. 154, p. 1628*).
8. Sur la filtration des suc végétaux. (*C. R. Ac. Sc. t. 175, p. 286*).
9. Chimie agricole. (*T. II, J. Baillière et fils Paris 1924*).

BERTHELOT ET ANDRÉ G.

10. Sur l'état de la potasse dans les plantes et dans le terreau et sur son dosage. (*C. R. Ac. Sc. t. 105, p. 911*).
11. Dosage du soufre des sulfates dans la plante (*Ann. de Ch. et de Phy.* 1892, t. 25).
12. Sur la silice dans les végétaux (*Ann. Ch. et Phy.* 1892, t. 27).

BERTHELOT.

13. Sur la présence et le dosage du Cl dans les plantes (*C. R. Ac. Sc. t. 128, p. 23*).
14. Sur le dosage du phosphore et du soufre dans les végétaux et dans leurs cendres. (*C. R. Ac. Sc. t. 128, p. 1899*).
15. Le soufre dans les végétaux. (*Ann. Ch. et Phy.* 1892).
16. Recherches sur les composés alcalins insolubles contenus dans les tissus végétaux vivants. (*Ann. Ch. et Ph. 2^e série, t. 8 1906*).

BERTHAULT ET CROCHETELLE.

17. Sur un blé provenant d'un terrain salé en Algérie. (*C. R. Ac. Sc. t. 120, p. 691*).

BLANCHARD ET CHAUSSIN J.

18. Antagonisme entre les chlorures (Sylvinite et KCl) employés à fortes doses et les sulfates au cours du développement du blé et de l'avoine en grande culture. (*C. R. Ac. Sc. t. 185, p. 218*).
19. Influence d'un engrais complet sur la pression osmotique chez quelques plantes agricoles. Action spéciale des engrais potassiques. (*C. R. Ac. Sc. t. 188, p. 1515*).
20. Régulation physico-chimique dans le milieu intérieur de quelques plantes agricoles. (*C. R. Ac. Sc. t. 190, p. 1139*).

BOUSSINGAULT

21. Perte de soufre à la calcination. Economie rurale. (*T. II p. 231*).

BRUNO.

22. Le Chlore, aliment de la plante. (*Extrait des comptes-rendus du X^e Congrès de chimie industrielle (1930)*).

CHAUSSIN J.

23. Etude du milieu soluble et des tissus insolubles au cours du développement du blé. Influence d'un engrais minéral complet. (*C. R. Ac. Sc. t. 179 p. 1195*).
24. Etude du milieu intérieur et des tissus insolubles au cours du développement du blé. (*Ann. de la Sc. Agron. fr. et étrang. numéro 3, mars-avril 1925*).
25. Etude du milieu intérieur dans les différents tissus de la pomme de terre au cours de son développement. (*C. R. Ac. Sc. t. 186, p. 1649*).

COLIN H. ET GRANDSIRE.

26. Structure et chimisme dans la betterave. (*C. R. Ac. Sc. t. 180, p. 599*).

COMBES R.

27. La vie de la cellule végétale. (*Armand Colin, Paris-1927*).

DEMOUSSY.

28. Sur l'absorption des sels halogènes du K par les plantes. (*Thèse Paris-1899*).

DETMER.

29. Manuel technique de Physiologie végétale. (*Traduction Michels p. 281 et 282*).

ECHEVIN ROBERT.

30. L'azote, le phosphore et le soufre chez les plantes ligneuses à feuilles caduques. (*Thèse de Paris* 1931).

H. DEVAUX.

31. Les échanges très rapides d'ions entre les tissus vivants et intacts des plantes et des animaux et les solutions salines mises à leur contact. (*Bulletin de la Société de Physique* 1930).

DUMONT ANDRÉE.

32. Etude bibliographique et critique de la mesure de la concentration des liquides cellulaires végétaux. (*Annales de Physiologie et de Physico-chimie biologique* numéro 2 1926, p. 215).

GIRARD P.

33. Schème physique pour servir à l'étude de la nutrition minérale de la cellule. (*C.R. Ac. Sc. t. 168, p. 1335*).

JOULIE H.

34. Sur la composition et les exigences des céréales. (*Moniteur scientifique. Année 1894*).

JODIN V.

35. Du rôle de la silice dans la végétation du maïs. (*C. R. Ac. Sc. t. 97, p. 344*).

LAGATU ET MAUME L.

36. Evolution remarquablement régulière de certains rapports physiologiques (chaux, magnésie, potasse) dans les feuilles de la vigne bien alimentée. (*C. R. Ac. Sc. t. 179, p. 782*).

LAPICQUE L.

37. Sur l'absorption des sels par les cellules végétales. Epictèse et sélection. (*Bulletin de la Société de chimie biologique, t. VII, numéro 6, juin 1925, p. 621*).
38. Variation saisonnière dans la composition chimique des algues marines. (*C. R. Ac. Sc. t. 169, p. 1.426*).

LAPICQUE L. ET CHAUSSIN J.

39. Sur les méthodes de mesure de la concentration moléculaire globale dans les tissus végétaux. (*C. R. Soc. biologie t. XCI p. 423 12 juillet 1924*).

LECHARTIER G.

40. Sur les variations de composition des topinambours au point de vue des matières minérales. (*C. R. Ac. Sc. t. 113, p. 423 et 451*).

LESAGE P.

41. Influence de la salure sur la formation de l'amidon dans les organes végétaux chlorophylliens, (*C.R. Ac. Sc. t. 112, p. 672 et 891*).
42. Le chlorure de sodium dans les plantes. (*C. R. Ac. Sc. 1892, t. 144, p. 143*).
43. Plantes salées et transmissibilité des caractères acquis. (*C. R. Ac. Sc. 1915, t. 161, p. 440*).
44. Sur la stabilisation des caractères acquis dans les plantes salées. (*C. R. Ac. Sc. t. 168, p. 1003*).

LIEBIG.

45. Les lois naturelles de l'Agriculture. *T. II. Chap. II.*

LOEB J.

46. La dynamique des phénomènes de la vie. (*Trad. Daudin et Schoeffer. Paris 1908*).
47. Les Protéines. (*Trad. H. Mouton, F. Alcan. Paris 1924*).
48. La théorie des phénomènes colloïdaux. (*Trad. H. Mouton F. Alcan. Paris 1925*).

MALAGUTI ET DUROCHER.

49. Recherches sur la répartition des éléments inorganiques dans les principales familles du règne végétal. (*C. R. Ac. Sc. t. 93, p. 384, 446 et 482*).

MAQUENNE L.

50. Sur l'accumulation du sucre dans les racines de betteraves. (*C. R. Ac. Sc. t. 121, p. 834*).
51. Sur la pression osmotique dans les graines germées. (*C. R. Ac. Sc. t. 123, p. 898*).
52. Précis de physiologie végétale. (*Payot et Cie. Paris 1922*).

MAQUENNE ET DEMOUSSY.

53. Sur la toxicité de quelques sels à l'égard des feuilles vertes (*C. A. Ac. Sc. t. 151, p. 178*).
54. Sur la mobilité de la potasse dans les tissus (*C. R. Ac. Sc. t. 158, p. 1400*).

MAUME L. ET DULAC J.

55. Sur l'antagonisme positif, nul ou négatif des mélanges binaires d'électrolytes à l'égard des végétaux. (*C. R. Ac. Sc. t. 187, p. 668*).
56. Corrélation entre l'antagonisme positif et l'absorption par le végétal. (*C. R. Ac. Sc. t. 187, p. 769*).

MAZE.

57. Sur l'excrétion des substances minérales et organiques par les racines et les stomates aquifères. (*C. R. Ac. Sc. t. 152, p. 452*).
58. Influence sur le développement de la plante des substances minérales qui s'accumulent dans ses organes. Absorption des matières organiques colloïdales par les racines. (*C. R. Ac. Sc. t. 152, p. 783*).
59. Loi du minimum et des rapports physiologiques. (*C. R. Ac. Sc. t. 154, p. 1711*).
60. Sur le mécanisme des échanges de la plante. (*C. R. Ac. Sc. t. 159, p. 271*).
61. Les échanges nutritifs chez les végétaux, rôle du protoplasme. (*C. R. Ac. Sc. t. 159, p. 271 et 809*).

MESTREZAT ET JANET M.

62. La dispersion des colloïdes électrolytiques du protoplasme dans ses rapports avec la nutrition minérale de la cellule. (*C. R. Ac. Sc. t. 178, p. 2281*).

MOLLIARD M.

63. Etude sur une Mucédinée. *Stérigmatocystis nigra*. (*C. R. Ac. Sc. t. 174, p. 881*).
64. Nutrition de la plante. Echanges d'eau et de substances minérales. (*Gaston Doin, Paris 1921*).

MUNTZ.

65. Sur la répartition du sel marin selon les altitudes. (*C. R. Ac. Sc. t. 112, p. 447*).

OSTERHOUT.

66. On the importance of physiologically balanced solutions for plants.
 - I. — Marine plants. (*Bot. Gaz. T. XLII 1906, p. 127*).
 - II. — Fresh-water and terrestrial plants. (*Bot. Gaz. T. XLIV 1907, p. 259*).

PIERRE (Isidore).

67. Chimie agricole. Le sel marin dans le sol et dans les plantes. (*T. I, page 126 et t. II, page 360*).

POUGET ET CHOUCHAK.

68. Influence de la concentration des solutions de substances nutritives sur l'absorption des végétaux. (*C. R. Ac. Sc. t. 154, p. 1709*).
69. Sur la loi du minimum. (*C. R. Ac. Sc. t. 155, p. 303*).

PICHARD.

70. Contribution à la recherche des formes et des conditions sous lesquelles le Cl du sol pénètre ordinairement dans les végétaux terrestres. (*C. R. Ac. Sc. t. 168, p. 615*).

SCHLOESING Th.

71. Sur l'acide phosphorique des sols. (*C. R. Ac. Sc., t. 132, p. 1189*).

SHREIBER.

72. Le sol et les engrais. (T. II : *Les Engrais. Librairie agricole de la maison rustique. Paris 1926*).

SILBERSTEIN.

73. Contribution à l'étude du S dans le sol et chez les végétaux. (*Thèse-Paris 1928*).
-

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	5
 HISTORIQUE. — Exposé sommaire des théories relatives à la	
nutrition des végétaux cultivés	11
a) Les tables de Wolff	11
b) Points de vue sous lesquels nous envisagerons la minéralisation du milieu intérieur	13
c) Matières minérales plastiques et osmotiques	13
d) Les lois du minimum et des rapports physiolo- giques	16
e) Equilibres physiologiques	18
f) Le milieu intérieur	21
g) Théorie de l'épictèse	25
 MÉTHODES OPÉRATOIRES	 27
a) Prise de l'échantillon sur le terrain	27
b) Méthode du bouillon	28
c) Techniques analitiques	31
d) Méthode d'évaluation des résultats	34

PREMIERE PARTIE

LE RÔLE DE L'ION CHLORE DANS LA VÉGÉTATION

I - Historique sommaire des travaux antérieurs sur le rôle du chlore dans la végétation	28
II - But de nos recherches	40
III - Les quantités de chlore contenues dans le milieu intérieur des plantes dépendent des doses d'engrais chlorurés qu'on met à leur disposition	42
IV - Les chlorures jouent un rôle osmotique important dans les plantes	45

DEUXIEME PARTIE

COMPARAISON ENTRE LES QUANTITÉS D'IONS Cl ET SO⁴ QUI ENTRENT DANS LA COMPOSITION DU MILIEU INTÉRIEUR DES PLANTES

I - Historique sommaire des travaux antérieurs sur le rôle du soufre dans la végétation	47
--	----

II - L'ion Cl monovalent se trouve généralement en plus grandes proportions que l'ion SO_4 divalent dans le milieu intérieur des plantes	50
III - De fortes applications de chlorures peuvent être dangereuses pour les plantes	54

TROISIÈME PARTIE

PHÉNOMÈNES DE COMPENSATION

DANS LA COMPOSITION MINÉRALE DU MILIEU INTÉRIEUR

I - Exposé sommaire du rôle des anions PO_4 , SiO_3 et des anions d'acides organiques dans le milieu intérieur	57
a) Acide phosphorique	57
b) Silice	59
c) Anions d'acides organiques	60
II - La régulation physico-chimique	61
a) Relation entre la matière minérale et la matière organique	62
b) Les compensations minérales	64
1° Blé	64
2° Navets	65
3° Haricots	66
CONCLUSIONS GÉNÉRALES	67

QUATRIÈME PARTIE

INFLUENCE DES CHLORURES

SUR LES RENDEMENTS DES DIVERSES PLANTES CULTIVÉES

I - Considérations générales	69
II - L'addition de chlorure de potassium aux fumures augmente les rendements des récoltes. Ces rendements s'accroissent en même temps que les quantités de chlorure employées	73
III - Il existe pour les diverses cultures des doses de chlorures au-delà desquelles les rendements cessent d'augmenter	76
IV - Les augmentations de rendements obtenues par l'addition de chlorure de potassium paraissent dues à la fois à l'action du Potassium et à celle du Chlore	79
V - Action simultanée de la chaux et du chlorure de potassium sur les rendements des cultures	84
VI - Considérations économiques	89
CONCLUSIONS GÉNÉRALES AU POINT DE VUE TECHNIQUE	93
BIBLIOGRAPHIE	95

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté :

Physiologie. — Explication physiologique de l'usage du sel de cuisine : rôle dans l'alimentation du bétail.

Géologie. — Influences géologiques et climatologiques sur la formation des sols.

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 19 avril 1932

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

C. MAURAIN.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

S. CHARLETY.
